TP 14731F

Spécification de modification d'un scanner haute vitesse

Préparé pour :

Centre de développement des transports

de

Transports Canada

Par:

Mai 2007

TP 14731F

Spécification de modification d'un scanner haute vitesse

par :

Charles Massicotte

Innovation maritime

Mai 2007

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles du Centre de développement des transports de Transports Canada ou des organismes parrains.

Le Centre de développement des transports et les organismes parrains n'ont pas l'habitude de citer des noms de produits ou de fabricants. S'ils le font ici, c'est simplement pour la bonne compréhension du texte.

An English summary is included before the Table of Contents.

© 2007 Transports Canada

Transports Canada / Transport Canada

FORMULE DE DONNÉES POUR PUBLICATION

1. N° de la publication de Transports Canada	2. N° de l'étude	3. N° de catalogue du destinataire
TP 14731F	5677	

4. Titre et sous-titre	5. Date de la publication
Spécification de modification d'un scanner haute vitesse	Mai 2007
	6. N° de document de l'organisme exécutant

7. Auteur(s)	8. N° de dossier - Transports Canada
Charles Massicotte	2450-120-42

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant	10. N° de dossier - TPSGC
Innovation Maritime 53, rue Saint-Germain Ouest Rimouski (Québec) G5L 4B4	MTB-6-20434
	11. N° de contrat - TPSGC ou Transports Canada
	T8200-6-6503/001/MTB

12. Nom et adresse de l'organisme parrain	13. Genre de publication et période visée
Centre de développement des transports (CDT) 800, boul. René-Lévesque Ouest Bureau 600 Montréal (Québec) H3B 1X9	Final
	14. Agent de projet
	Charles Gautier

15. Remarques additionnelles (programmes de financement, titres de publications connexes, etc.)

Coparrainé par le programme de recherche et de développement énergétiques de Ressources naturelles Canada.

16. Résumé

Une procédure a été définie afin de convertir un scanner radar BridgeMaster E pour l'opération à une vitesse de rotation de 120 tr/min. Cette procédure a été établie pour effectuer la conversion d'une unité radar commerciale.

Le scanner radar original a d'abord été caractérisé, les températures et les puissances de fonctionnements ont été mesurées et un modèle tridimensionnel a été mis au point. Un concept de conversion a ensuite été développé à partir des données de caractérisation. La conversion a été effectuée et finalement validée par des essais en fonctionnement continu.

Le scanner modifié constitue une solution économique faisant partie des composantes requises pour l'assemblage d'un radar marin haute performance.

17. Mots clés	18. Diffusion
Scanner haute vitesse, BridgeMaster E, 120 tr/min, glace, procédure, radar, détection	Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires imprimés. Disponible également en ligne à www.tc.gc.ca/cdt/menu.htm

19. Classification de sécurité (de cette publication)	20. Classification de sécurité (de cette page)	21. Déclassification (date)	22. Nombre de pages	23. Prix
Non classifiée	Non classifiée	—	xii, 40, ann.	Port et manutention

Transport Canada / Transports Canada

PUBLICATION DATA FORM

1. Transport Canada Publication No.	2. Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 14731F	5677	

4. Title and Subtitle	5. Publication Date
Spécification de modification d'un scanner haute vitesse	May 2007
	6. Performing Organization Document No.

7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
Charles Massicotte	2450-120-42

9. Performing Organization Name and Address	10. PWGSC File No.
Innovation Maritime 53 St-Germain Street West Rimouski, Quebec G5L 4B4	MTB-6-20434
	11. PWGSC or Transport Canada Contract No.
	T8200-6-6503/001-MTB

12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Publication and Period Covered
Transportation Development Centre (TDC) 800 René Lévesque Blvd. West Suite 600 Montreal, Quebec H3B 1X9	Final
	14. Project Officer
	Charles Gautier

15. Supplementary Notes (Funding programs, titles of related publications, etc.)

Co-sponsored by the Program of Energy Research and Development of Natural Resources Canada.

16. Abstract

A procedure has been developed to convert a BridgeMaster E radar scanner to operate at a rotation speed of 120 rpm. The procedure was established in order to convert a commercial radar unit.

First, the original radar scanner was characterized, operating temperatures and power levels were then measured, and a three-dimensional model was developed. A conversion design was developed from the characterization data. The conversion was performed and then validated by tests in continuous operation.

The modified scanner constitutes an economical solution and is one of the components required to assemble a high-performance marine radar system.

17. Key Words	18. Distribution Statement
High-speed scanner, BridgeMaster E, 120 rpm, ice, procedure, radar, detection	Limited number of print copies available from the Transportation Development Centre. Also available online at www.tc.gc.ca/tdc/menu.htm

19. Security Classification (of this publication)	20. Security Classification (of this page)	21. Declassification (date)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	—	xii, 40, apps	Shipping/ Handling

Remerciements

Les auteurs désirent remercier Charles Gautier du Centre de développement des transports de Transports Canada pour son soutien et ses conseils.

Équipe de recherche

M. Charles Massicotte, ingénieur jr. électrique et chargé de projet
M. Jean-François Goulet, ingénieur électromécanique et superviseur
M. Gratien Lebrun, technicien en électronique
M. François Lévesque, technicien en technologie physique
M. Yan Lévesque, ingénieur électromécanique
M. Aurem Langevin, ingénieur jr. électromécanique

Sommaire

Les scanners de bord courant tournent à une vitesse de 25 à 30 tr/min et balayent l'horizon à une vitesse suffisante pour permettre un taux de rafraîchissement adéquat de l'affichage radar pour la plupart des navires. Au cours des dernières années, bon nombre de recherches importantes ont été menées par le CDT afin d'étudier les avantages de vitesses de rotation d'antenne plus élevées, soit autour de 120 tr/min. Les recherches ont démontré que l'utilisation d'un scanner à vitesse angulaire élevée (autour de 120 tr/min), de concert avec un processeur numérique radar, améliore grandement la vitesse de détection de petites cibles.

Dans le cadre de ces activités de recherches, Innovation maritime a été mandaté pour convertir un scanner radar BridgeMaster E pour la rotation à 120 tr/min. De plus, Innovation maritime devait réaliser une procédure permettant de répéter cette conversion.

Le scanner radar a d'abord été caractérisé. Les températures de fonctionnement et la puissance nécessaire à la rotation de l'antenne à vitesse élevée ont été évaluées. Un modèle tridimensionnel du boîtier du radar a été réalisé. À partir des résultats de caractérisation, les spécifications de la conversion ont été conçues.

La conversion a été conçue dans le but de minimiser les coûts et les risques d'interférence électromagnétique, de réduire la température de fonctionnement et d'optimiser le système d'entraînement.

Lors de la phase de conception, la résistance du système d'entraînement et la puissance du moteur ont été déterminées. La compatibilité du nouveau système d'entraînement avec le boîtier existant a été validée à l'aide du modèle tridimensionnel. La résistance des éléments clés a été validée par calcul.

La conversion a ensuite été mise en œuvre selon les plans conçus. Mis à part des ajustements nécessaires pour réduire les vibrations, la conversion est conforme aux plans.

Le scanner radar converti a ensuite été mis en fonction sur un banc d'essai permettant d'exposer l'antenne à des vents connus. La puissance fournie au moteur et les températures de fonctionnement ont été mesurées. Ensuite, le scanner radar a été testé en fonctionnement continu sur un autre banc d'essai en effectuant un monitoring des températures et de la puissance, en plus d'effectuer des inspections visuelles périodiques du système d'entraînement. Aucune anomalie n'a été décelée lors des essais.

À partir des photos des étapes de conversion et du modèle tridimensionnel, un document décrivant la procédure de conversion a été réalisé.

Une procédure de conversion a été définie et validée. La conversion peut être effectuée en mode prêt-à-monter et est entièrement réversible. Le scanner haute vitesse résultant est conforme aux spécifications originales du radar sauf pour la vitesse de rotation et peut résister à des vents de 180 km/h. Le scanner modifié constitue une solution économique faisant partie des composantes requises pour l'assemblage d'un radar marin haute performance.

Summary

Conventional marine radar scanners rotate at a speed of 25 to 30 rpm, scanning the horizon at a sufficient speed to generate an adequate radar display refresh rate for most vessels. Over the past few years, the Transportation Development Centre (TDC) has conducted a great deal of research to study the advantages of a higher antenna rotation speed – approximately 120 rpm. The research has shown that using a high-speed scanner (approximately 120 rpm) together with a digital radar processor greatly increases small target detection speed.

As part of these research activities, Innovation Maritime was contracted to convert a BridgeMaster E radar scanner to a rotation speed of 120 rpm. Innovation Maritime also had to develop a procedure for repeating this conversion.

First, the radar scanner was characterized. The operating temperatures and power levels required to rotate the antenna at a higher speed were then evaluated. A three-dimensional model of the radar enclosure was created. Using the characterization results, conversion specifications were developed.

The conversion was designed with a view to minimizing costs and electromagnetic interference, reducing operating temperature, and maximizing drive system durability.

During the design phase, drive system strength and motor power were determined. The compatibility of the new drive system with the existing enclosure was validated using the three dimensional model and the strength of key elements was validated by calculation.

The conversion was then performed according to the design that had been developed. Aside from some necessary adjustments to reduce vibration, the conversion was consistent with the design plans.

The converted radar scanner was operated on a test bed to expose the antenna to various known wind speeds. The power supplied to the motor and operating temperatures were measured. The radar scanner was then tested in continuous operation on another test bed during which temperatures and power were monitored and regular visual inspections of the drive system were performed. No faults were detected during testing.

Using photographs of the conversion process and the three-dimensional model, a document describing the conversion procedure was developed.

A conversion procedure was developed and validated. The conversion can be installed as a kit and is fully reversible. The resulting high-speed scanner is compliant with the original radar specifications except for rotation speed and can withstand winds of 180 km/h. The modified scanner constitutes an economical solution and is one of the components required to assemble a high-performance marine radar system.

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION 1

2 SPÉCIFICATIONS DES EXIGENCES 1

2.1 VITESSE DE ROTATION 1
2.2 SYSTÈME D'ENTRAÎNEMENT 1
2.2.1 Contrôleur et moteur 1
2.2.2 Boîte de vitesse 2
2.2.3 Courroies et poulies 2
2.2.4 Roulements 2
2.3 MODIFICATIONS AU BOÎTIER 2
2.4 ALIMENTATION 2
2.5 MESURE D'AZIMUT 2
2.6 COÛT DE LA CONVERSION 3
3 CARACTÉRISATION INITIALE 3
3.1 SYSTÈME D'ENTRAÎNEMENT 3
3.1.3 Ensemble courroie et poulies 6
3.2 CARACTÉRISATION DU SIGNAL L'ENCODEUR 8
3.4 MESURES THERMIQUES 11
3.5 MESURES DE PUISSANCE 12
3.6 MODÈLE TRIDIMENSIONNEL 16
3.7 RÉSISTANCE DU ROULEMENT 17

4 SPÉCIFICATION DES COMPOSANTS 17

4.1 MODÈLE MATHÉMATIQUE 17
4.2 CONFIGURATION 18
4.2.1 Moteur interne 19
4.2.2 Moteur externe 19
4.3 ESPACE DISPONIBLE 20

5 CONCEPTION 21

5.1 ÉQUIPEMENTS SÉLECTIONNÉS 21
5.1.1 Moteur 22
5.1.2 Contrôleur 22
5.1.3 Filtre d'entrée 22
5.1.4 Réducteur 22
5.1.5 Roue d'encodeur 23
5.1.6 Arbre et accouplement 23
5.1.7 Circuit d'isolation d'azimut 24
5.2 PIÈCES À FABRIQUER 25
5.3 SYSTÈME D'ENTRAÎNEMENT SUITE À LA CONVERSION 26

6 MISE EN ŒUVRE 27

6.1 RÉALISATION DE L'EXTENSION DU BOÎTIER 27
6.2 DÉMONTAGE DU RADAR 27
6.3 REMONTAGE 27

7 CARACTÉRISATION SUITE À LA CONVERSION 29

7.1 ESSAIS EN TEMPÉRATURE 30
7.2 VALIDATION DE L'ENCODEUR DE POSITION 30

7.3 Essais avec vent contrôlé 33
7.4 Essais en fonctionnement continu 36
8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 37
8.1 Conclusion 37
8.2 Recommandations 38
BIBLIOGRAPHIE 40
ANNEXES 1
Annexe A - Modèle du couple causé par le vent sur une antenne radar 1
Annexe B - Évaluation de puissance de moteur 1
Annexe C - Espace disponible à l'intérieur du boîtier 1
Annexe D - Estimation du coût de conversion 1

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Système d'entraînement original 3
Figure 2 - Moteur d'origine 4
Figure 3 - Réducteur d'origine 5
Figure 4 - Courroie de transmission 6
Figure 5 - Petite poulie 7
Figure 6 - Grande poulie 7
Figure 7 - Vitesse de rotation mesurée à partir de la roue d'encodeur à 45 tr/min 9
Figure 8 - Distance entre les fronts montants de la roue d'encodeur 10
Figure 9 - Irrégularités des dents de l'encodeur 11
Figures 10a et 10b - Senseurs de température 11
Figure 11 - Plateforme mobile du CDT, Transports Canada 13
Figure 12 - Puissance crête fournie au moteur original en fonction du vent 14
Figure 13 -Vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent à 45 tr/min 15
Figure 14 - Vue isométrique extérieure du boîtier modélisé 16
Figure 15 - Vue isométrique intérieure du boîtier modélisé 17
Figure 16 - Extension au boîtier 19
Figure 17 - Configuration avec moteur extérieur 20
Figure 18 - Pièce virtuelle représentant l'espace disponible 21
Figure 19 - Configuration des circuits d'azimut avant et après modification 25
Figure 20 - Représentation du nouveau système d'entraînement 26
Figure 21 - Extension au boîtier 27
Figure 22 - Réducteur original 28
Figure 23 - Réducteur suite à la conversion 28
Figure 24 - Intérieur du boîtier après conversion 29
Figure 25 - Nouvelle roue dentée 31
Figure 26 - Constance de la vitesse de rotation avant et après la conversion à 45 tr/min, sans vent 32
Figure 27 - Puissance fournie au moteur en fonction du vent à 120 tr/min 34
Figure 28 - Constance de la vitesse de rotation à 120 tr/min, sans vent 35
Figure 29 - Montage d'essai sur camion 36
Figure 30 - Montage d'essai sur plateforme fixe 37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Résultats des mesures thermiques avant conversion 12
Tableau 2 - Puissances crêtes mesurées avec antenne Raytheon 13
Tableau 3 - Liste de matériel pour le système d'entraînement 26
Tableau 4 - Résultats des mesures thermiques après conversion 30
Tableau 5 - Puissance mesurée suite à la conversion 33

1 Introduction

Le but du projet de radar haute vitesse était de convertir un radar BridgeMaster E de type *masthead* pour permettre sa rotation à 20-120 tours par minute (tr/min). Le radar a d'abord été caractérisé et, à partir des résultats obtenus, des modifications ont été conçues, mises en œuvre et validées.

Les objectifs visés pour cette conversion étaient de minimiser les coûts tout en fournissant une conception fiable et performante.

Ce document est divisé en cinq sections. La première les spécifications des exigences pour la conversion. La seconde présente les activités de caractérisations, c'est-à-dire une brève description de la méthode utilisée et des mesures effectuées et la troisième décrit le cheminement entrepris pour concevoir les modifications. Les équipements retenus pour la conversion. La quatrième section développe les étapes de la conversion et décrit la conversion réelle du radar. La dernière section explique les essais qui ont été effectués pour valider la conversion du radar.

2 Spécifications des exigences

La section suivante décrit les spécifications des exigences que devra atteindre l'unité radar BridgeMaster E suite à la conversion en radar haute vitesse. De façon générale, l'unité radar modifiée devra rencontrer les mêmes exigences que l'unité originale, avec les particularités et avertissements suivants.

2.1 Vitesse de rotation

L'objectif de la conversion est de changer la plage de vitesse de rotation sur laquelle l'unité radar BridgeMaster E peut fonctionner. L'unité radar originale peut être utilisée à deux vitesses de rotation, 28 et 45 tr/min. La conversion doit permettre à l'unité radar de fonctionner sur toute la plage de vitesse de rotation entre 20 et 120 tr/min. Pour atteindre cette nouvelle plage de vitesse, certaines contraintes devront être respectées et sont discutées dans les points suivants.

2.2 Système d'entraînement

Cette section décrit les exigences que devront atteindre les composantes du système d'entraînement pour la rotation à 120 tr/min. La conversion décrite dans ce document sera valide pour une antenne de huit pieds.

2.2.1 Contrôleur et moteur

Le moteur du radar après la conversion devra être suffisamment puissant pour la rotation à 20-120 tr/min. La puissance requise du moteur sera déterminée lors de la phase de conception.

De plus, il est possible que les nouvelles conditions d'utilisation provoquent une plus grande élévation de la température du moteur et de l'air à l'intérieur de l'enceinte. Les températures avant et après la conversion seront mesurées. Le protocole de mesure sera

décrit dans le rapport de caractérisation. Les températures après la conversion devront être à l'intérieur des températures spécifiées. La température ambiante maximale spécifiée pour le moteur original est de 40°C. La seule spécification relative à la température mentionnée pour le BridgeMaster E est une température minimale de -40°C. La plupart des pièces électroniques industrielles sont conçues pour fonctionner de -40 à 70°C. Le contrôleur de moteur original est conçu pour fonctionner à 28 et 45 tr/min. Comme l'unité radar devra pouvoir fonctionner sur toute la plage de 20 à 120 tr/mins, le contrôleur original devra être modifié ou un nouveau contrôleur devra être utilisé. Il devra être interfacé avec l'ordinateur de contrôle, préférablement par le port USB. La vitesse de rotation pourra donc être contrôlée directement à partir de l'ordinateur.

2.2.2 Boîte de vitesse

La boîte de vitesse actuelle est conçue pour tourner à une vitesse maximale de 4000 tr/min et elle est présentement utilisée à sa vitesse maximale lorsque l'antenne tourne à 45 tr/min. Le fait de simplement augmenter la vitesse de rotation du moteur ne sera donc pas une option, la boîte de vitesse devra être modifiée ou remplacée.

2.2.3 Courroies et poulies

Les courroies et poulies devront être en mesure de supporter les contraintes accrues dues à la rotation à 120 tr/min. Ces contraintes seront déterminées lors de la phase de conception.

2.2.4 Roulements

Comme décrit dans la fiche de spécification du BridgeMaster E, l'antenne doit pouvoir survivre à un vent de 100 nœuds. Cette spécification ne devra pas être affectée si des modifications doivent être apportées aux roulements de l'arbre de l'antenne ou à toute autre partie de l'unité radar.

2.3 Modifications au boîtier

Il est possible que les modifications au moteur et au système d'entraînement nécessitent des modifications au boîtier. Si le boîtier doit être modifié, l'étanchéité du boîtier ne devra pas être affectée. La modification au boîtier devra être préférablement réversible. De plus, la modification du boîtier ne devra pas interférer avec la base de montage et devra offrir la même solidité que le boîtier original.

2.4 Alimentation

L'unité radar originale est conçue pour fonctionner sur 120/230 VAC, 50/60Hz. Une fois convertie, l'unité radar devra pouvoir fonctionner avec les mêmes alimentations.

2.5 Mesure d'azimut

Sur l'unité radar originale, l'azimut est mesuré directement sur l'arbre à l'aide d'une roue dentelée de 128 dents. Un circuit multiplie la fréquence par 32 pour obtenir 4096 impulsions par révolution. Il est possible que le circuit ne fonctionne pas à 120 tr/min. Si c'est le cas, il devra être modifié ou remplacé pour que la résolution de la mesure d'azimut soit suffisante pour une mesure précise de l'angle d'azimut. La précision angulaire totale du circuit d'azimut et de la roue dentée ne devra pas excéder 0,05 degrés.

Une sortie indépendante (c'est-à-dire isolée) du signal d'azimut devra également être fournie pour des développements futurs.

2.6 Coût de la conversion

Le but de la conversion du BridgeMaster E est de fournir une alternative de radar haute vitesse à coût raisonnable. Le coût d'une unité BridgeMaster E étant d'environ 23 000 $, le coût de la conversion devra être minimisé dans la mesure du possible, et ne pas dépasser 10 000 $.

3 Caractérisation initiale

Cette section présente les activités de caractérisation effectuées sur le radar avant la conversion. Le système d'entraînement du radar original a d'abord été identifié. L'antenne a ensuite été mise en rotation pour mesurer les températures de fonctionnement. Pendant cette phase, un problème de mesure d'azimut a été décelé. Finalement, la puissance requise pour faire tourner l'antenne à 120 tr/min a été évaluée.

3.1 Système d'entraînement

Le système d'entraînement du radar original est constitué d'un moteur de 195 watts qui entraîne un réducteur de 30:1. Le réducteur entraîne à son tour une poulie d'entraînement comportant 28 dents, reliée par une courroie à une plus grande poulie de 84 dents, pour une réduction de 3:1. La grande poulie est directement reliée à l'arbre de l'antenne. La réduction totale entre le moteur et l'antenne est donc de 90:1.

Lorsque l'antenne tourne à 28 tr/min, le moteur tourne à 2520 tr/min. Pour la rotation de l'antenne à 45 tr/min, le moteur tourne à 4050 tr/min, ce qui est légèrement supérieur à la vitesse nominale du réducteur, qui est de 4000 tr/min. Le système d'entraînement original est schématisé à la figure 1.

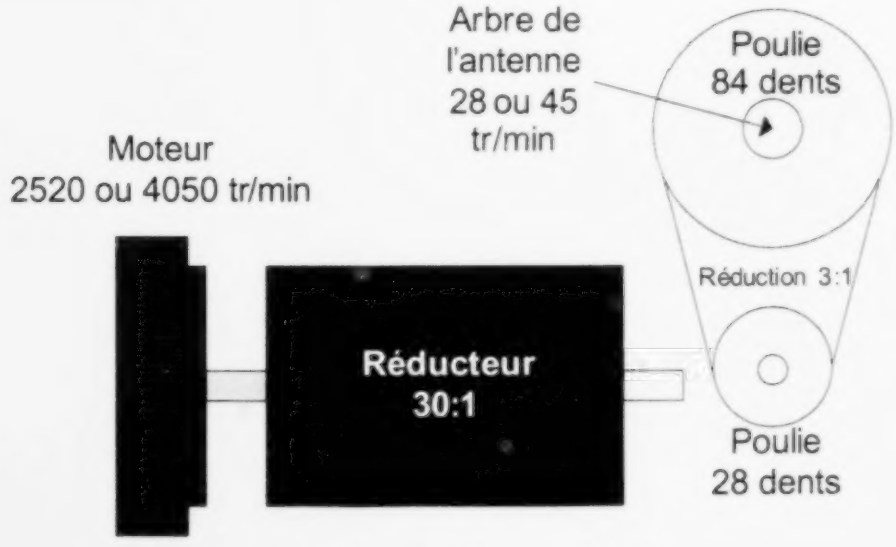


Figure 1 - Système d'entraînement original

Le moteur a été identifié comme étant une version OEM du moteur ECA 7010 de PAPST. Ce moteur tourne à une vitesse maximale de 500 tr/min, a une puissance de 195W et un couple nominal de 0,37 N.m et un couple maximal de 0,9 N.m.

Manufacturier : PAPST
Modèle: ECA 7010
Autres inscriptions :
LITTON
Part# 9100 3787-1a
PAPST 991 7010 017
3605

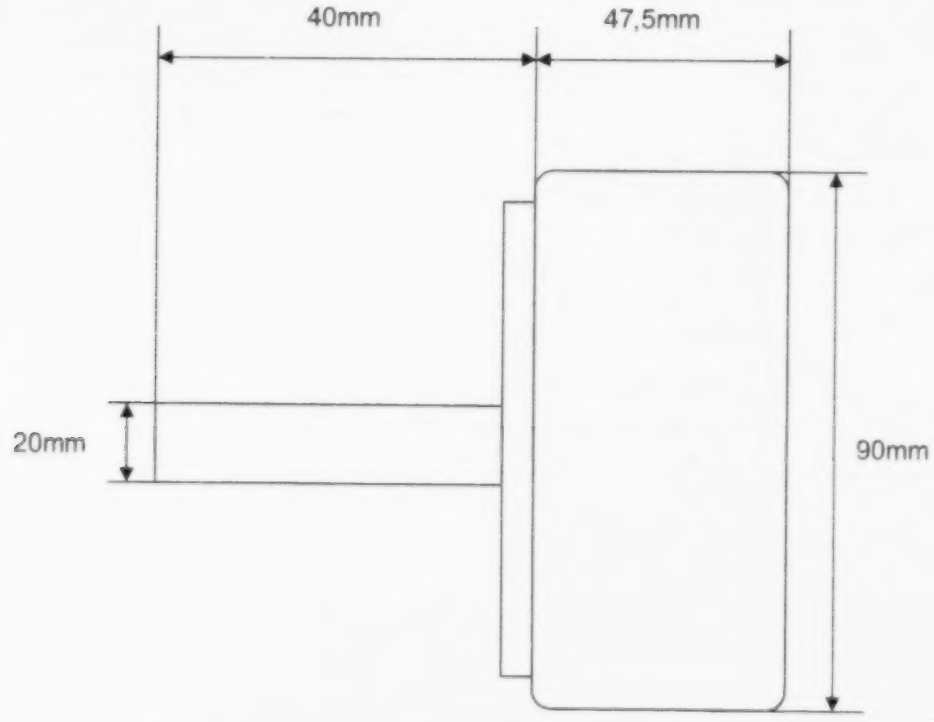


Figure 2 - Moteur d'origine

3.1.2 Réducteur

Le réducteur est fabriqué par le manufacturier Suisse GYSIN. Il a un facteur de réduction de 30 : 1, une efficacité de 96 %, un couple maximal de sortie de 6 N.m et est conçu pour tourner à une vitesse d'entrée nominale de 4000 tr/min, ce qui correspond à une rotation de l'antenne de 45 tr/min.

Manufacturier : GYSIN
Modèle: GPL-080-2GW/30 :1
Autres inscriptions :
CH-4452 ITINGEN
Planetengriebe GPL-080-2GW/30 :1
27334-54105-0790-YL SWISS MADE
Arbre à la sortie: 20.0 mm
Trou pour arbre d'entrée : 14 mm
L1 = 114.5 mm
L2= 79.5 mm

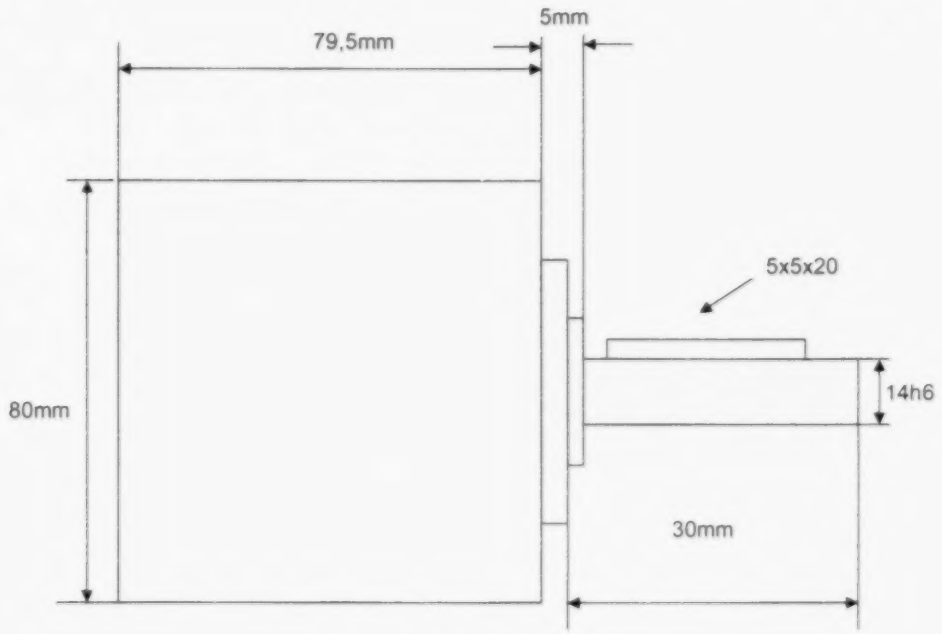


Figure 3 - Réducteur d'origine

3.1.3 Ensemble courroie et poulies

L'ensemble courroie et poulies est constitué de deux poulies d'un rapport de vitesse de 3 : 1 et d'une courroie dentée de type « courroie de distribution ». La courroie est une version sur mesure de la courroie Powergrip GT de Gates. Comme elle est d'une largeur de 40 mm, elle n'est pas disponible sur le marché. Elle comporte 100 dents avec la forme GT unique à Gates d'un espacement de 5 mm.

Manufacturier: Gates
Modèle : PowerGrip GT
Autres inscriptions:
Made in UK
5MR 500 40
3 275DS

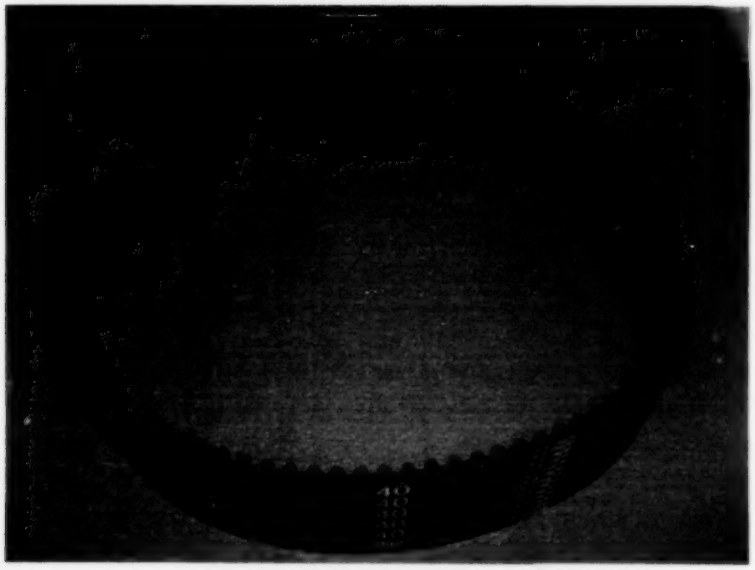


Figure 4 - Courroie de transmission

Petite poulie

Nombre de dents : 28
Diamètre pointe-pointe : 43.5 mm
Diamètre intérieur : 20.0 mm

Figure 5 - Petite poulie

Grande poulie

Nombre de dents : 84
Diamètre pointe-pointe : 130.5 mm

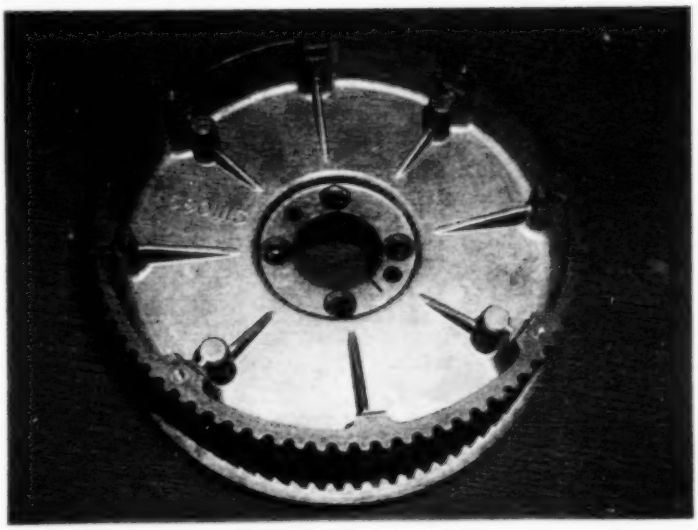


Figure 6 - Grande poulie

3.2 Caractérisation du signal l'encodeur

Afin de fournir les sorties isolées d'azimut et de *heading marker*, le signal d'azimut a dû être caractérisé. L'azimut de l'antenne est mesuré à l'aide d'une roue d'encodeur de 128 dents qui hache un faisceau optique. Le *heading marker* est mesuré de la même manière mais avec une seule dent par tour. La sortie des senseurs optiques est 0-5 volts.

Le signal d'azimut à 128 impulsions par révolution est ensuite multiplié par 32 par un circuit PLL pour obtenir une résolution de 4096 impulsions par révolution. Un sélecteur permet de choisir deux plages de fonctionnement pour le multiplicateur de fréquence, soit 28 et 45 tr/min.

Lors des mesures à l'intérieur, donc sans vent, la vitesse de rotation a été mesurée. Les mesures du signal d'azimut montraient que l'antenne subissait des changements de vitesse abrupts qui ne pouvaient correspondre à la réalité étant donné les observations visuelles et la grande inertie du système mécanique, voir figure 7.

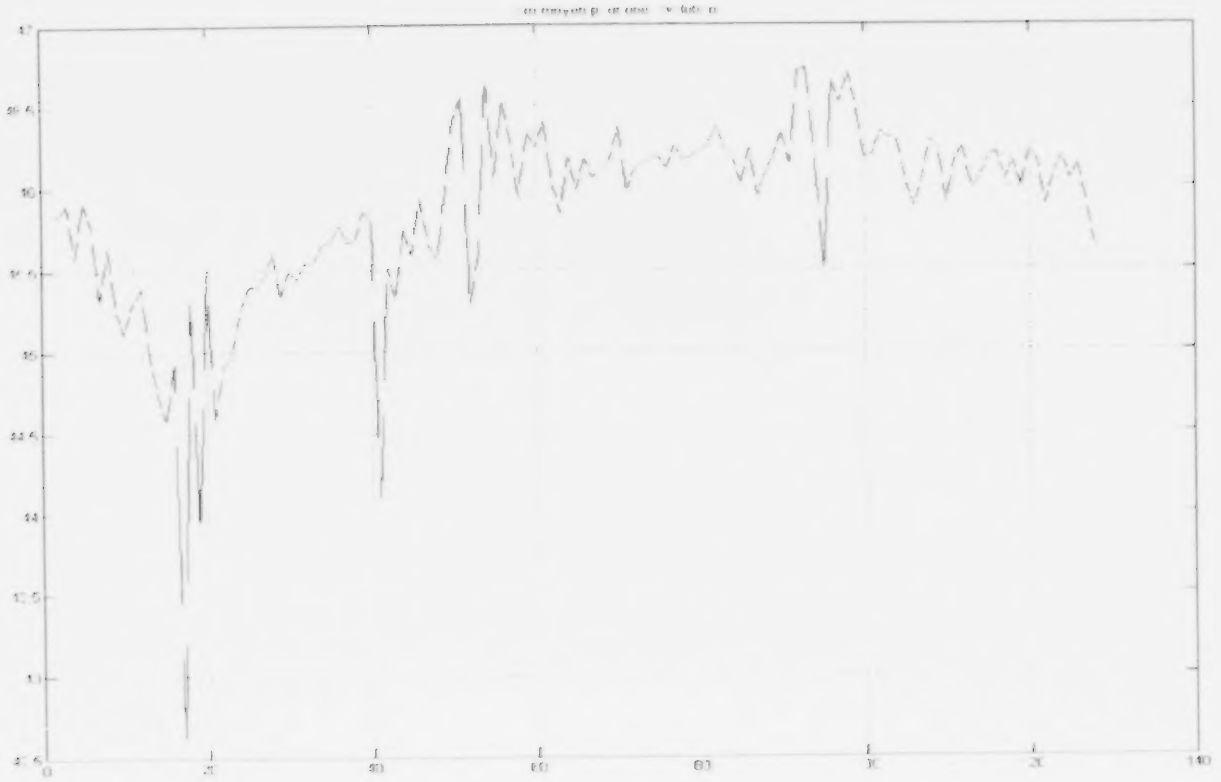


Figure 7 - Vitesse de rotation mesurée à partir de la roue d'encodeur à 45 tr/min

Calcul de l'erreur de dimension des dents de l'encodeur
La distance entre deux fronts montants sur les dents de la roue d'encodeur est de 3,81 mm.

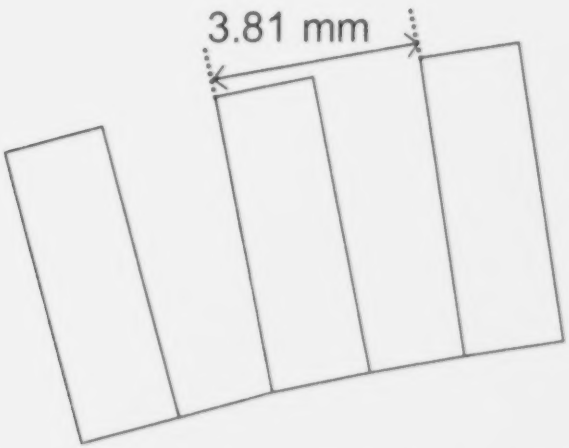


Figure 8 - Distance entre les fronts montants de la roue d'encodeur

Variation de vitesse de rotation observée : on peut observer sur la figure 7 une variation abrupte de 42,5 à 45,5 tr/min. La variation instantanée est donc de 3 tr/min.

L'erreur de largeur d'une dent est donc de $\frac{3\ tr/\min}{45\ tr/\min} \bullet 3{,}81\ mm = 0{,}254\ mm$

Erreur angulaire

$s = r \bullet \theta$

$0{,}254\ mm = 77.788\ mm \bullet \theta$

$\theta = 0{,}0033\ rad = 0{,}187°$

Lors du démontage du radar, la roue d'encodeur a été examinée. La roue est fabriquée de plastique et les dents présentent des bavures de démoulage pouvant atteindre 0,25 mm (figure 9). Les variations de vitesse constatées étaient donc probablement causées en grande partie par les différences de largeur entre les dents de l'encodeur.

Il a été convenu qu'une nouvelle roue d'encodeur devrait être fabriquée avec une tolérance plus sévère sur la largeur des dents.

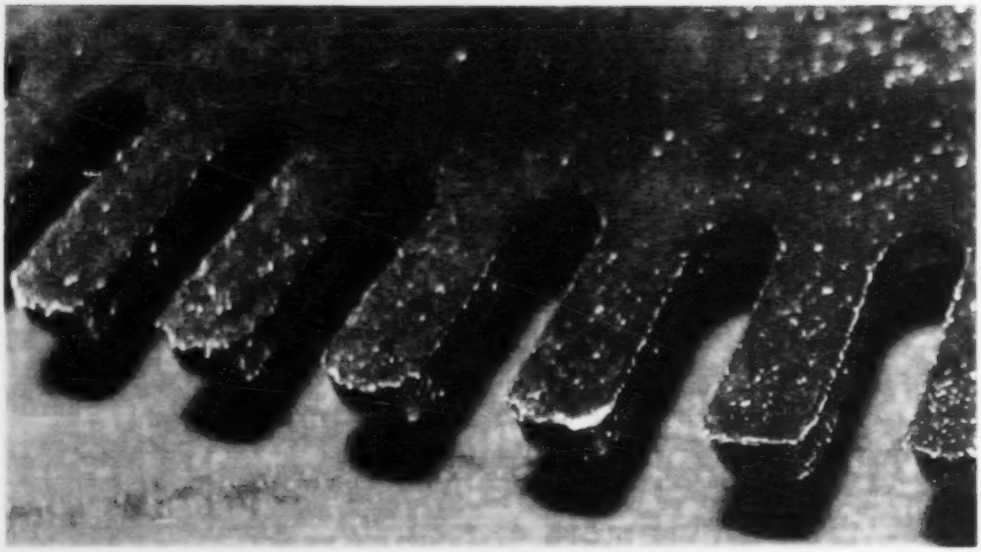
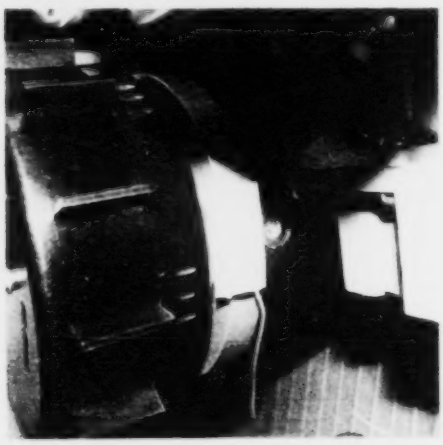


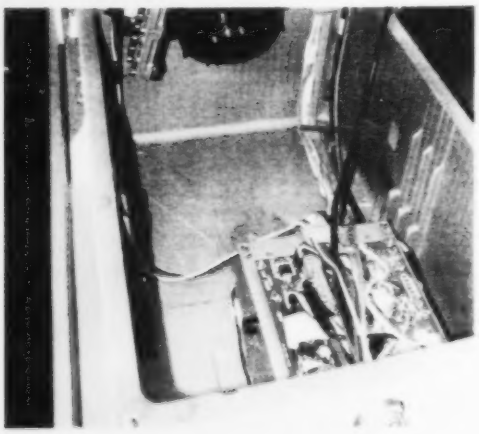
Figure 9 - Irrégularités des dents de l'encodeur

3.4 Mesures thermiques

Les mesures de température ont été effectuées à l'aide de deux senseurs, un premier placé sur le châssis du moteur et l'autre sur le boîtier. Les températures ont été mesurées à l'arrêt et en marche pour des vitesses de 28 et 45 tr/min. La température ambiante était fixée à 30 degrés Celsius et les délais de stabilisation étaient de deux heures.

Ces mesures seront utiles pour déterminer la nécessité de prendre des actions pour améliorer le refroidissement à l'intérieur du boîtier suite à la conversion.





Figures 10a et 10b - Senseurs de température

Équipements utilisés pour les mesures thermiques

Thermocouples de types T
Manufacturier : Omega
Modèle : SA1-T-72

Transmetteurs 4-20 mA étalonné pour thermocouples type T
Manufacturier : Omega
Modèle : TX91A-T3

Tableau 1 - Résultats des mesures thermiques avant conversion

	Température à 28 tr/min	Température à 45 tr/min
Boîtier	30,8 degrés Celsius	34,8 degrés Celsius
Moteur	39,2 degrés Celsius	48,0 degrés Celsius

3.5 Mesures de puissance

Cette sous-section décrit les mesures électriques effectuées sur le radar. Elles ont été effectuées afin de déterminer les caractéristiques du système d'entraînement. Le radar a été exposé à des vents de 0 à 100 km/h. Pour ce faire, le radar a été installé sur un camion (figure 11) dont la vitesse de déplacement simulait le vent. Le camion en question est une plateforme mobile appartenant au Centre de développement des transports, Transports Canada, dont Innovation maritime a actuellement la charge. La puissance fournie au contrôleur de moteur a été le paramètre retenu pour le calcul du couple causé par le vent sur l'antenne.

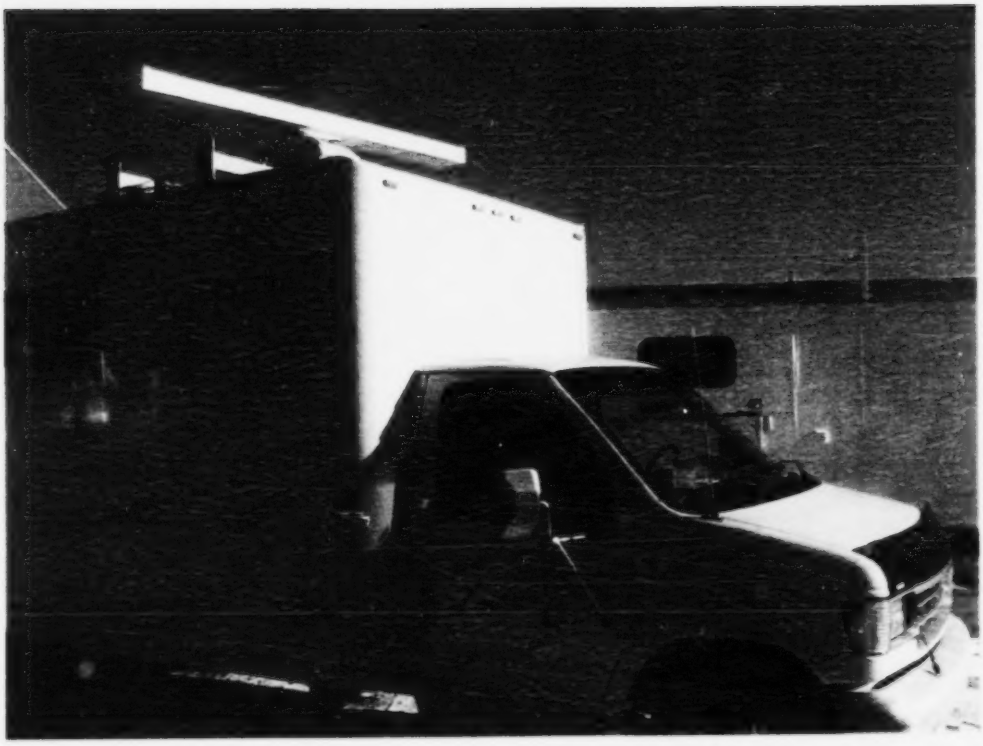


Figure 11 - Plateforme mobile du CDT, Transports Canada

L'évaluation du couple a posé un problème puisque le moteur d'origine n'avait qu'une puissance de 195 watts. À 45 tr/min, le moteur atteignait sa pleine puissance avec des vents de 50 km/h. Voir les figures 12 et 13 à ce sujet Les données recueillies à 45 tr/min sont donc inutilisables.

Toutefois, des mesures ont été prises en 2006 sur une autre antenne radar de taille similaire et ces données ont pu être utilisées afin de prédire la puissance requise pour la conversion. Ces données sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 - Puissances crêtes mesurées avec l'antenne Raytheon

Vitesse (km/h)	Puissance à 25 tr/min	Puissance à 120 tr/min
0	126 W	386 W
70	184 W	454 W
100	328 W	638 W

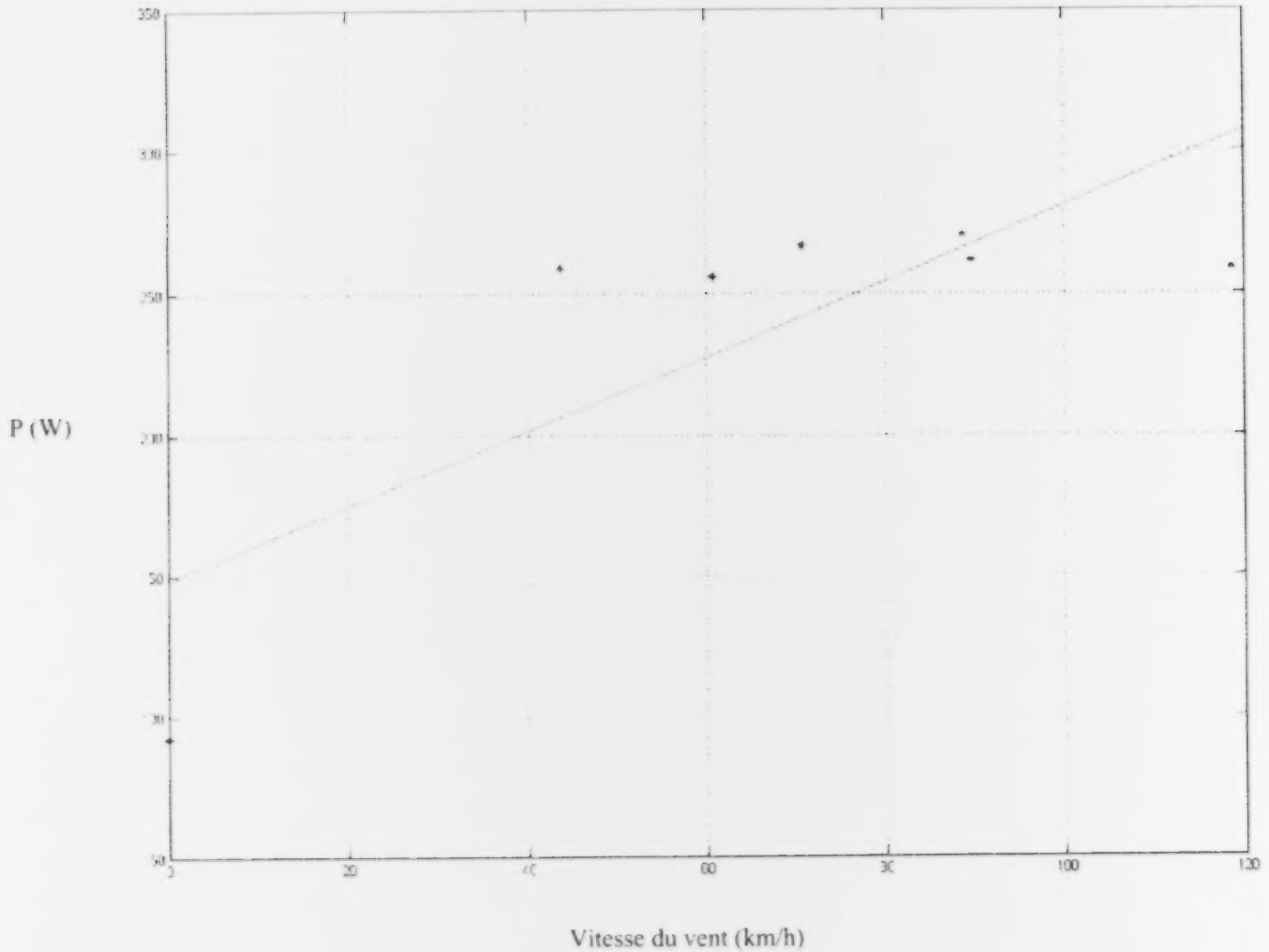


Figure 12 - Puissance crête fournie au moteur original en fonction du vent

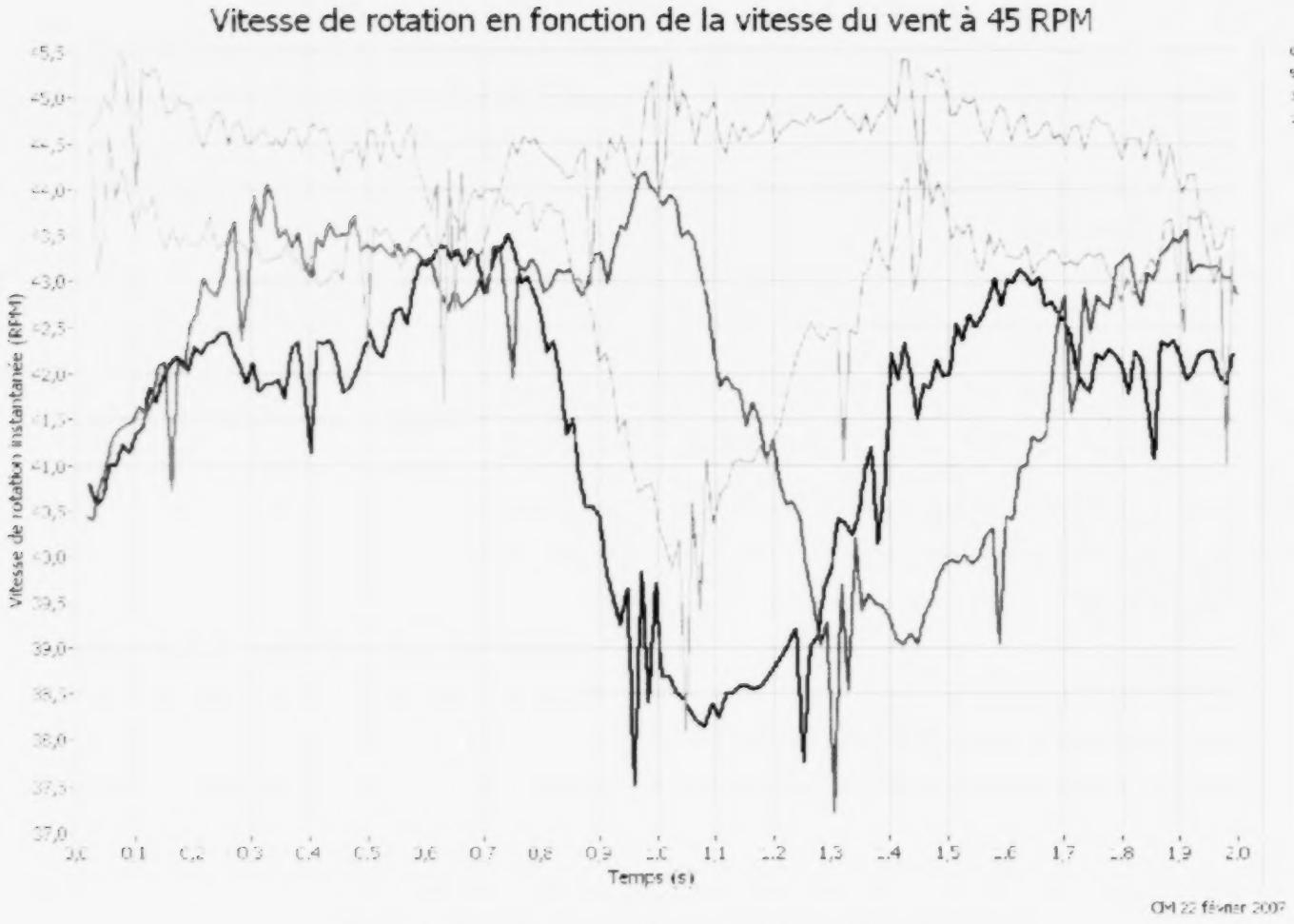


Figure 13 -Vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent à 45 tr/min

3.6 Modèle tridimensionnel

Afin de faciliter la conception mécanique, un modèle tridimensionnel (CAD) a été réalisé avec le logiciel *SolidEdge* et le modèle a été converti dans le format standard IGES pour les besoins du CDT. Les images suivantes donnent un aperçu du modèle réalisé.

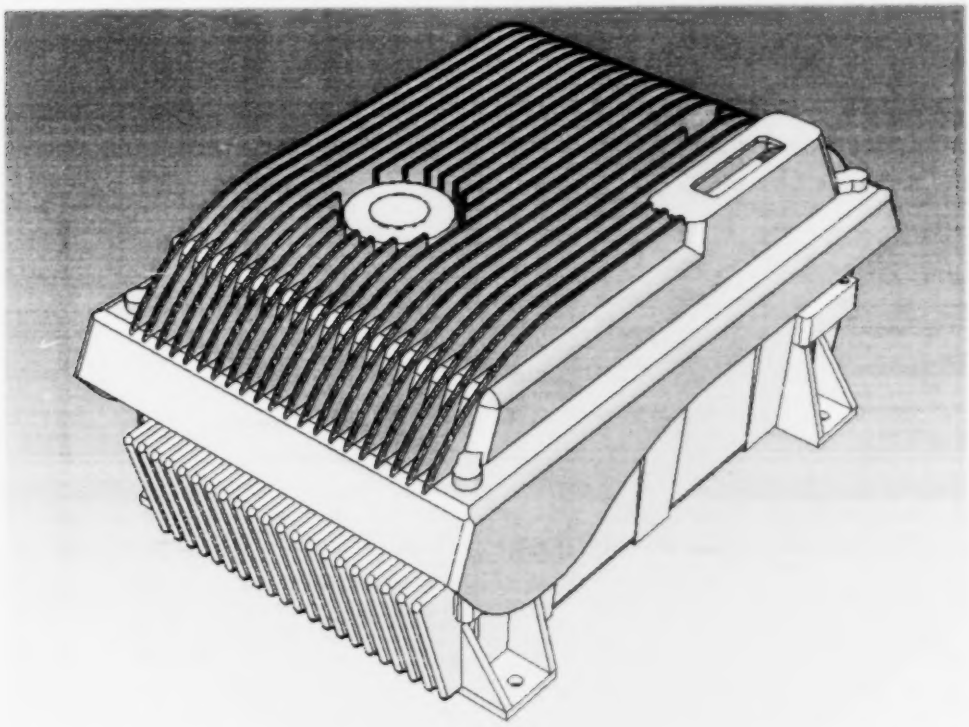


Figure 14 - Vue isométrique extérieure du boîtier modélisé

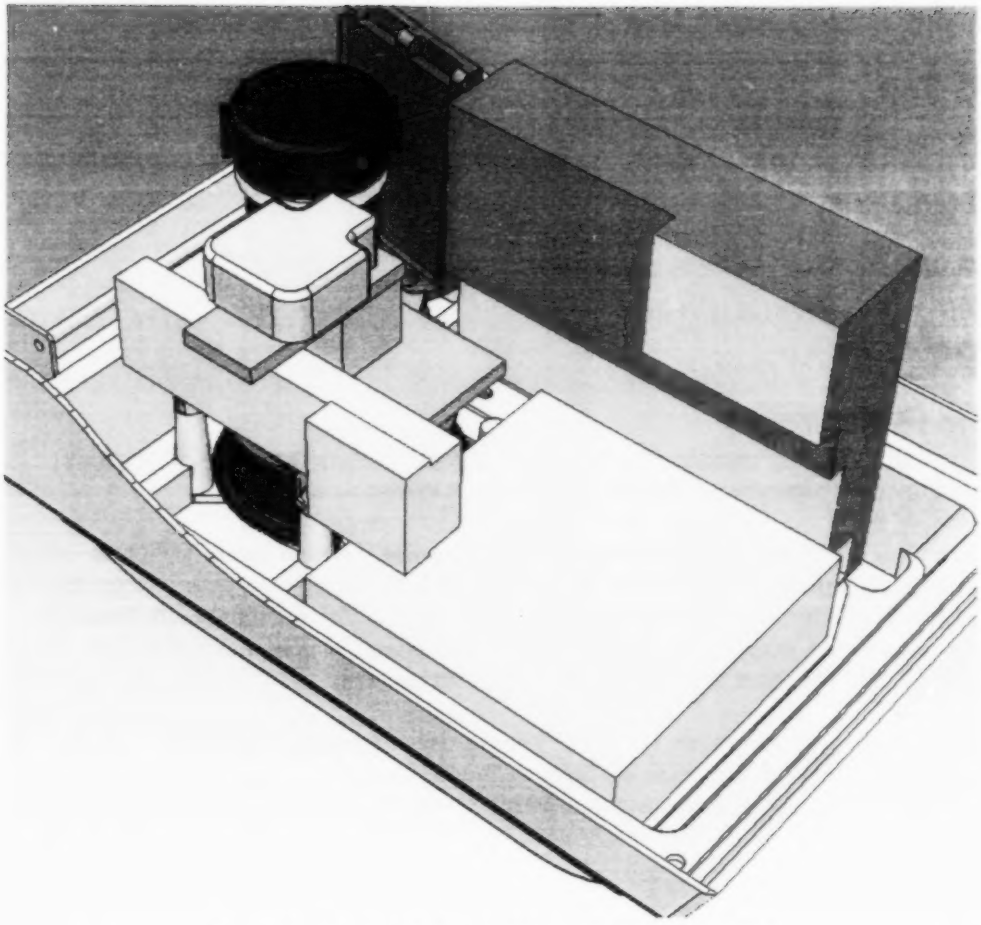


Figure 15 - Vue isométrique intérieure du boîtier modélisé

3.7 Résistance du roulement

Le roulement principal a été identifié, il est conçu pour une vitesse de rotation maximale de 5300 tr/min, la rotation à 120 tr/min ne pose donc pas de problème. De plus, l'augmentation de la vitesse de rotation de l'antenne aura peu d'impact sur les forces transversales, aucune modification n'est donc prévue.

4 Spécification des composants

4.1 Modèle mathématique

Un modèle mathématique a été soumis par Innovation maritime et il a été raffiné par Charles Gautier du CDT (voir les annexes A et B). En utilisant les mesures prises sur les radars Raytheon et BridgeMaster, la puissance crête du moteur requis a été évaluée à 1200 watts.

À partir de cette puissance, le couple maximal à l'antenne peut être déduit.

$$P = \mathrm{T} \bullet \omega$$

$$1200W = \mathrm{T} \bullet \frac{120 \bullet 2 \bullet \pi}{60}$$

$$\mathrm{T} = 95{,}5N \bullet m$$

$$Puissance = Couple \bullet vitesse\ angulaire$$

$$1200\ W = Couple \bullet 120 / 60 \bullet 2 \bullet \pi$$

$$Couple = 95{,}5\ N.m$$

4.2 Configuration

L'interprétation des résultats nous amène à conclure qu'un moteur de 1200 watts est suffisant pour répondre au besoin en couple et en vitesse de rotation.

Le moteur d'origine a une puissance de 195 W et a une longueur totale de 48 mm. L'espace additionnel disponible à l'arrière du moteur est de 16 mm, pour un total de 64 mm disponible au maximum. Un moteur typique de 1200 W est toutefois beaucoup trop volumineux pour l'espace disponible dans le boîtier. Le boîtier doit donc être modifié pour accueillir le nouveau système d'entraînement.

La méthode de modification du boîtier retenue consiste à insérer une extension entre les parties supérieure et inférieure du boîtier (figure 16). Cette méthode a l'avantage d'être simple, réversible et n'implique aucun perçage du boîtier.

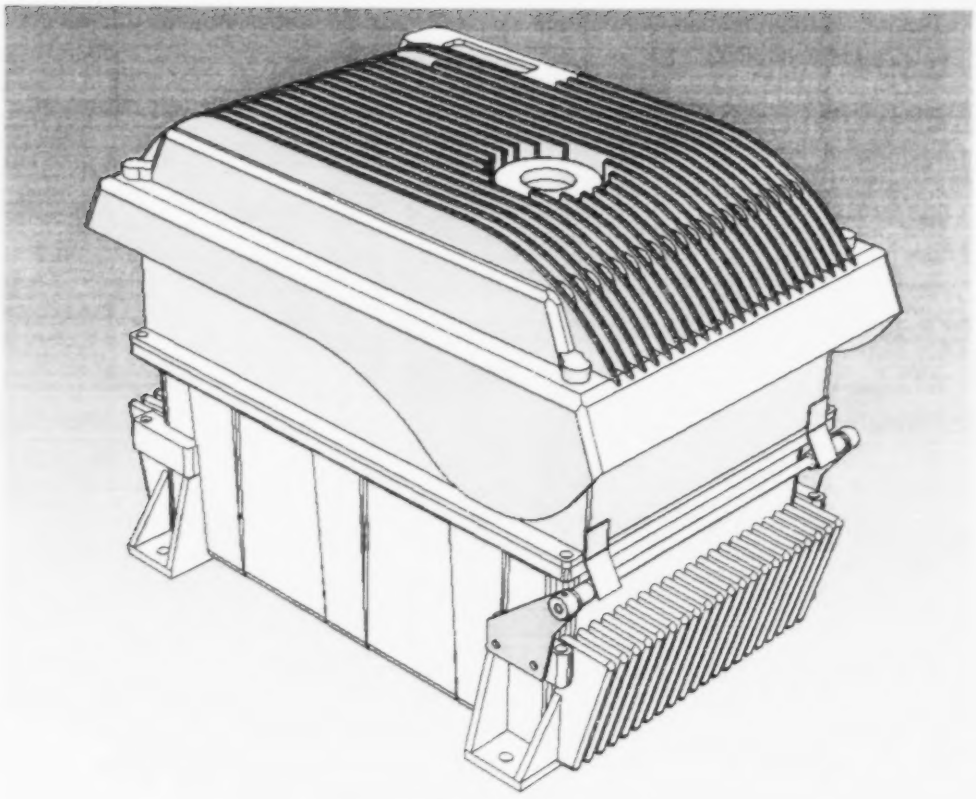


Figure 16 - Extension au boîtier

Deux configurations d'installation du moteur ont été considérées pour la conversion. Les deux configurations impliquent l'extension du boîtier présentée précédemment.

4.2.1 Moteur interne

Cette configuration implique l'installation du moteur à l'intérieur du boîtier de la même manière que le moteur original. Toutefois, comme la puissance a été évaluée à 1200 watts, le moteur devra être très volumineux, ce qui demanderait une extension très longue par rapport aux autres configurations. De plus, le moteur risque de produire plus de chaleur que le moteur original, ce qui causerait une plus grande élévation de température à l'intérieur du boîtier. Pour ces raisons, cette configuration a été rejetée.

4.2.2 Moteur externe

La configuration de conversion la moins coûteuse et la moins risquée qui ait été évaluée est la configuration avec moteur extérieur (figure 17). Le fait que le moteur et son contrôleur soient à l'extérieur du boîtier comporte plusieurs avantages. Premièrement, le volume du moteur et de son contrôleur est moins restreint. Ensuite, le moteur et son contrôleur étant les principales sources de chaleur, cette configuration permet d'éviter les problèmes d'élévation en température à l'intérieur du boîtier. De plus, les problèmes de bruits électroniques constatés lors de la conversion du radar Raytheon seront évités.

Finalement, la modification ne nécessite aucun perçage du boîtier original, elle est donc complètement réversible.

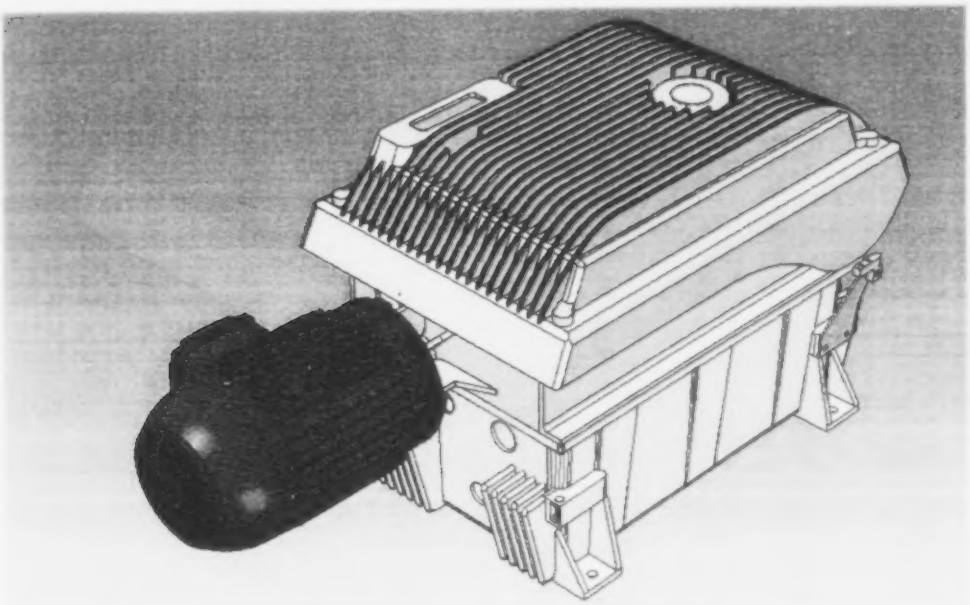


Figure 17 - Configuration avec moteur extérieur

4.3 Espace disponible

À l'aide du modèle CAD, une pièce virtuelle représentant l'espace disponible à l'intérieur du boîtier a été conçue pour vérifier la validité des modifications prévues et l'interférence avec les pièces existantes. La figure suivante montre cette pièce.

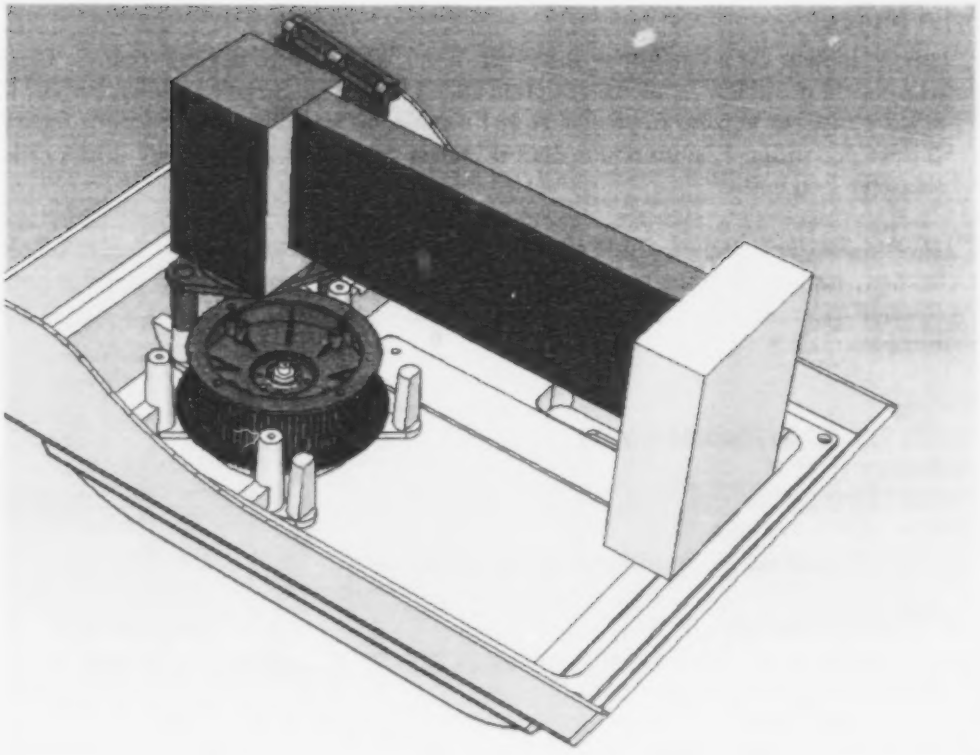


Figure 18 - Pièce virtuelle représentant l'espace disponible

L'espace disponible pour le réducteur a une dimension de 87 x 85 x 150 mm. L'arbre peut être d'un diamètre maximal de 39 mm. Un espace de 53 x 139 x 180 est également disponible à l'arrière du boîtier.

Les dimensions complètes de la pièce virtuelle sont détaillées dans l'annexe C.

5 Conception

La section suivante décrit le matériel sélectionné pour la conversion.

5.1 Équipements sélectionnés

Selon les spécifications des exigences, l'antenne du radar doit pouvoir être entraînée de 25 à 120 tr/min. Dans le but de minimiser les coûts et de simplifier la conversion, deux décisions ont été prises au départ. D'abord, la transmission par courroie originale est conservée. Cela permet également de conserver le même système d'encodeur. Ensuite, un moteur industriel commun, d'une vitesse nominale de 1750 tr/min, a été choisi. Le réducteur a été sélectionné en fonction de ces deux choix initiaux.

5.1.1 Moteur

Comme le moteur est à l'extérieur du boîtier, il doit être protégé des intempéries. Deux options étaient possibles. La première option était d'utiliser un moteur régulier, comme le VM8012 utilisé sur le radar Raytheon, et de l'installer à l'intérieur d'une enceinte fixée à l'extérieur du boîtier. L'autre option était d'utiliser un moteur étanche fixé directement sur l'extérieur du boîtier.

C'est cette deuxième option, soit le moteur étanche, qui a été retenue. Elle est plus simple à effectuer, beaucoup moins coûteuse et les moteurs extérieurs sont déjà certifiés pour l'utilisation qui en sera faite. De plus, le fabricant ABB, fournit déjà des moteurs pour des applications maritimes.

Moteur
Modèle : Marathon Black Max Y551
Puissance : 1500 W
Vitesse : 1760 tr/min
Tension : 230 V triphasé
Options : Peinture époxy extérieure avec traitement marin

5.1.2 Contrôleur

Le contrôleur a été choisi en fonction du moteur. Il peut être interfacé à un ordinateur.

Contrôleur de moteur
Modèle : ACS350-01U-07A5-2
Puissance spécifiée : 1500 W
Tension d'entrée : 240 V monophasé
Tension de sortie : 230 V triphasé

5.1.3 Filtre d'entrée

Pour éviter les transitoires sur la ligne d'alimentation qui pourraient causer du bruit sur les signaux du radar, un filtre est installé à l'entrée du contrôleur de moteur.

Filtre d'entrée
Fabricant : Polaris
Modèle : PLFR-OP0002Z5A
2 A, 5 %, NEMA 1

5.1.4 Réducteur

Le réducteur a été choisi en fonction de la vitesse de rotation du moteur, de la plage de vitesses de rotation visée et du couple maximal. Le moteur tourne à 1750 tr/min et la réduction de l'ensemble de la courroie et des poulies est de 3:1. L'agent de lubrification est le Nyogel 792D et est recommandé de -30 à 125 °C.

Vitesse de rotation
En prenant un réducteur 4:1 , la vitesse maximale devient :

$$1750\,tr/\min \bullet \frac{1}{3} \bullet \frac{1}{4} = 146\,tr/\min$$

Comme le moteur est utilisé avec un contrôleur, la vitesse de rotation de l'antenne pourra être ajustée de façon à couvrir entièrement la plage de vitesses de 25 à 120 tr/min.

Couple

De plus, le réducteur doit être en mesure de supporter le couple maximal subi par l'antenne. Le couple nominal continu à la sortie du réducteur est de 48 N.m et son couple maximal est de 144 N.m (voir annexe I).

Le couple maximal à l'antenne est de 95,5 N.m

Comme les poulies ont un facteur de déduction de 3:1, le couple à l'entrée des poulies est de $\frac{96N.m}{3} = 32N.m$

Le couple nominal continu du réducteur est supérieur au couple crête, le réducteur est donc suffisamment robuste et ne se dégradera pas prématurément.

Dimensions

Deux autres éléments importants ont été considérés dans le choix du réducteur, soit ses dimensions et la position des trous de fixation. Le modèle de réducteur retenu peut être fixé directement sur les trous de l'ancien réducteur, ce qui élimine le besoin de concevoir une nouvelle pièce pour maintenir en place le réducteur.

Réducteur

Fabricant : Apex Dynamics
Modèle : ABR060-004-S1-P2/No Motor

5.1.5 Roue d'encodeur

La roue d'encodeur originale est conçue pour l'opération prévue du radar. La précision de sa fabrication est toutefois insuffisante pour les applications à haute vitesse. L'erreur de dimension des dents peut atteindre 0,25 mm, ce qui correspond à une erreur angulaire de 0,187 degrés. Une nouvelle roue sera machinée avec une précision de 1/40 mm, ce qui réduira l'erreur angulaire due à l'encodeur à l'intérieur de la limite acceptable de 0,05 degré.

Calcul de l'erreur angulaire due à la roue d'encodeur

$$1/40\,mm = 77.788\,mm \bullet \theta$$

$$\theta = 0{,}00032\,rad = 0{,}0184°$$

La roue d'encodeur sera fabriquée en aluminium anodisé.

5.1.6 Arbre et accouplement

Le réducteur est conçu pour accueillir un arbre de 14 mm. Un arbre de 14 mm sera donc utilisé pour raccorder le moteur au réducteur.

Calcul du couple à l'entrée du réducteur
Tel que calculé précédemment, le couple à la sortie du réducteur est de 32 N.m.
Le réducteur a un facteur de réduction de 4:1 le couple à l'entrée est donc :

$$\frac{32N.m}{4} = 8N.m$$

Calcul du couple maximal admissible pour un arbre en acier d'un diamètre de 14 mm.

$J = \frac{\pi d^4}{32}$ où J est le module de Young et d est le diamètre de l'arbre

$$r = \frac{14mm}{2} = 7\,mm$$

$\tau = S_y = 310\,MPa$ pour Acier

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J} = \frac{16T}{\pi d^3}$$

$$T = \frac{\tau \cdot J}{r} = \frac{310MPa \cdot \pi d^4 / 32}{d/2}$$

$$T = 310\,MPa \cdot \frac{\pi d^3}{16}$$

$$T = 310\,MPa \cdot \frac{\pi 14^3}{16}$$

$$T = 167\,N.m$$

Le couple crête sur l'arbre entre le moteur et le réducteur sera de 8 N.m et le couple maximal supportable par cet arbre est de 167 N.m. Le facteur de sécurité est donc supérieur à 10.

5.1.7 Circuit d'isolation d'azimut

Le circuit actuel du radar comporte un multiplicateur fréquence permettant de générer 4096 impulsions d'azimut à partir des 128 impulsions fournies par l'encodeur optique. Ce circuit multiplicateur agit comme interpolateur et permet d'amplifier les signaux destinés aux autres parties du radar. Le circuit multiplicateur actuel ne sera pas fonctionnel sur toute la plage de vitesses après modification. Un nouveau circuit a dû être réalisé pour effectuer la multiplication de fréquence sur toute la plage d'opération et fournir les sorties isolées prévues au plan de travail.

La multiplication normale est de 32. Toutefois, comme la rotation sera augmentée de 45 à 120 tr/min, ce facteur de multiplication a dû être réduit pour ne pas dépasser 4096 impulsions/seconde une fois multiplié, ce qui correspond au maximum que peut accepter le *trigger board*, soit un des circuits tributaires du multiplicateur.

Calcul du taux de multiplication

Bien que la vitesse de rotation visée soit de 120 tr/min, la vitesse maximale considérée pour la carte est de 150 tr/min. Cela correspond à 2,5 tr/sec. La roue compte 128 dents et, comme elle est directement couplée à l'arbre de l'antenne, elle fait 2,5 tours par seconde. La fréquence de sortie des détecteurs optiques est donc de $128 * 2{,}5 = 320$ *impulsions* / sec. Afin de respecter la limite de 4096 impulsions/sec du *trigger board*, la plus grande multiplication possible est de 12, produisant 3840 impulsions/seconde à 150 tr/min.

Les sorties isolées d'azimut pourront être à 128 ou à 1536 impulsions par révolution, selon la configuration de la carte. Le schéma bloc du positionnement de la nouvelle carte dans le système est présenté à la figure 20. Les documents de fabrication de la carte d'azimut sont dans le document « Manuel de conversion d'un scanner BridgeMaster E en scanner haute vitesse »

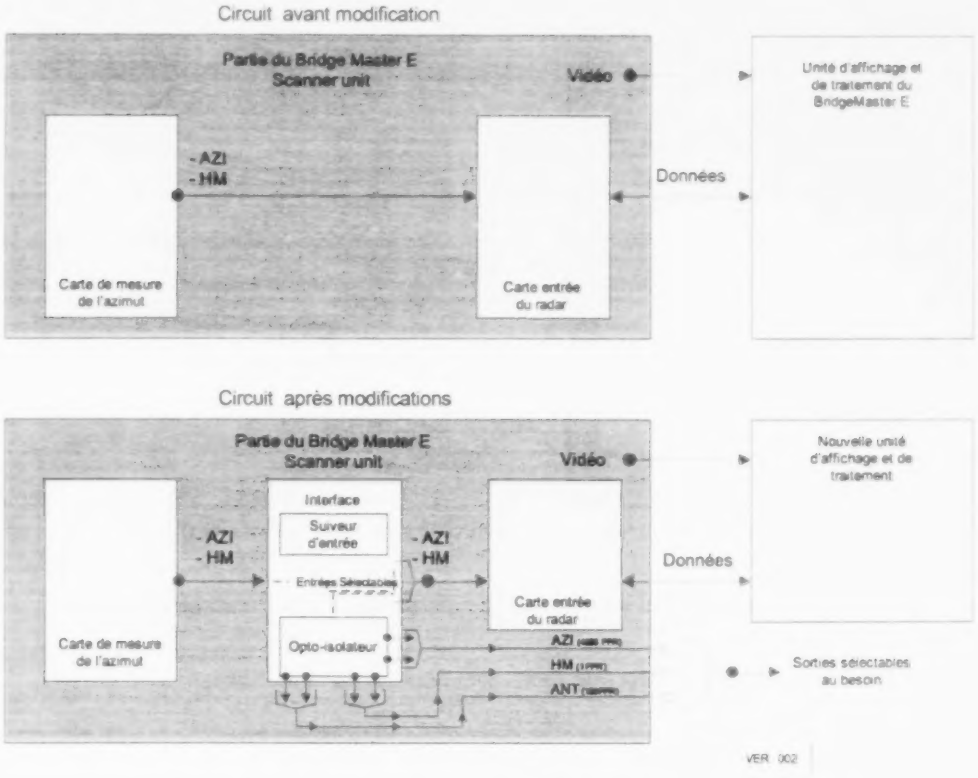


Figure 19 - Configuration des circuits d'azimut avant et après modification

5.2 Pièces à fabriquer

Deux pièces devront être fabriquées pour la conversion, soit la nouvelle roue d'encodeur et l'extension du boîtier. Les plans de ces pièces sont dans le document « Manuel de conversion d'un scanner BridgeMaster E en scanner haute vitesse »

Calcul du taux de multiplication

Bien que la vitesse de rotation visée soit de 120 tr/min, la vitesse maximale considérée pour la carte est de 150 tr/min. Cela correspond à 2,5 tr/sec. La roue compte 128 dents et, comme elle est directement couplée à l'arbre de l'antenne, elle fait 2,5 tours par seconde. La fréquence de sortie des détecteurs optiques est donc de 128 * 2,5 = 320 *impulsions* / sec . Afin de respecter la limite de 4096 impulsions/sec du *trigger board*, la plus grande multiplication possible est de 12, produisant 3840 impulsions/seconde à 150 tr/min.

Les sorties isolées d'azimut pourront être à 128 ou à 1536 impulsions par révolution, selon la configuration de la carte. Le schéma bloc du positionnement de la nouvelle carte dans le système est présenté à la figure 20. Les documents de fabrication de la carte d'azimut sont dans le document « Manuel de conversion d'un scanner BridgeMaster E en scanner haute vitesse »

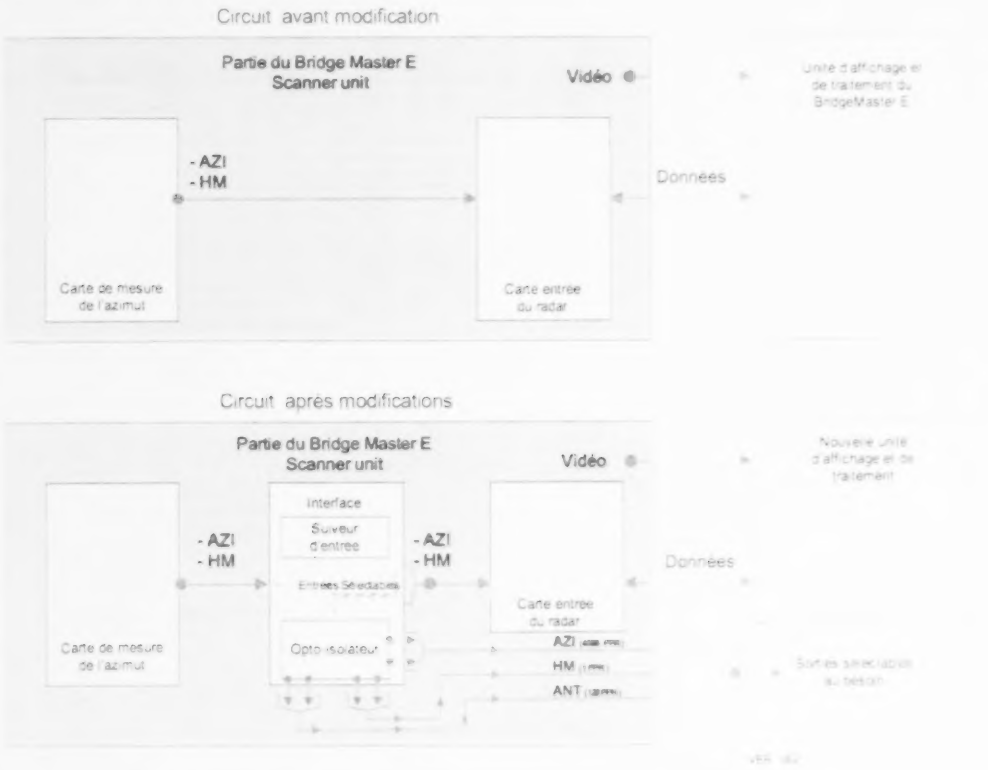


Figure 19 - Configuration des circuits d'azimut avant et après modification

5.2 Pièces à fabriquer

Deux pièces devront être fabriquées pour la conversion, soit la nouvelle roue d'encodeur et l'extension du boîtier. Les plans de ces pièces sont dans le document « Manuel de conversion d'un scanner BridgeMaster E en scanner haute vitesse »

5.3 Système d'entraînement suite à la conversion

Le nouveau système d'entraînement permet la rotation de 25 à 120 tr/min (figure 21). Le contrôleur de moteur permet l'ajustement de la vitesse de rotation du moteur de 300 à 1440 tr/min et le facteur de réduction combiné du réducteur et de la transmission par poulies est de 12.

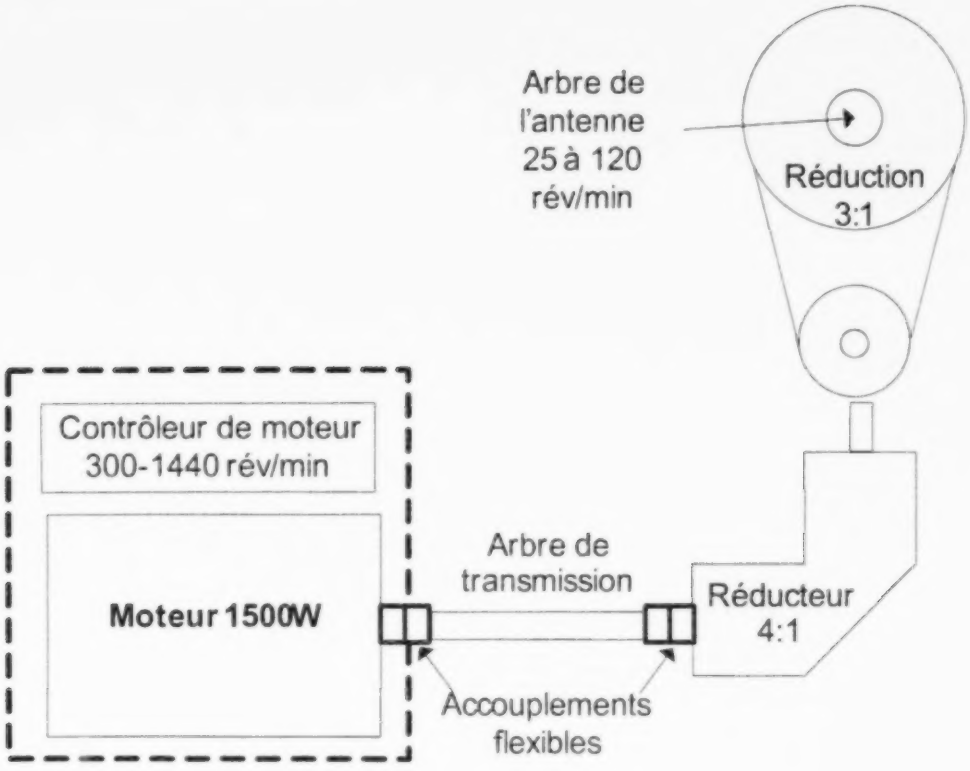


Figure 20 - Représentation du nouveau système d'entraînement

Le tableau 3 résume le matériel requis pour le nouveau système d'entraînement

Tableau 3 - Liste de matériel pour le système d'entraînement

Pièce	Modèle
Moteur	Marathon Black Max Y551
Contrôleur	ABB ACS350-01U-07A5-2
Réducteur	Apex Dynamics
Arbre	φ14 mm, acier rapide
Accouplement	0,875 pouce à 0,625 pouce
Accouplement	0,625 pouce à 0,625 pouce

6 Mise en œuvre

La section suivante décrit le déroulement de la mise en œuvre, les problèmes rencontrés et les solutions retenues. La conversion a été effectuée selon le document « Manuel de conversion d'un scanner BridgeMaster E en scanner haute vitesse »

6.1 Réalisation de l'extension du boîtier

L'extension du boîtier a été réalisée en plaques d'acier soudées. Des anneaux ont été ajoutés sur le côté pour permettre de retenir le boîtier en position ouverte. L'extension a ensuite été passée au jet de sable et peinte afin de résister à la rouille.

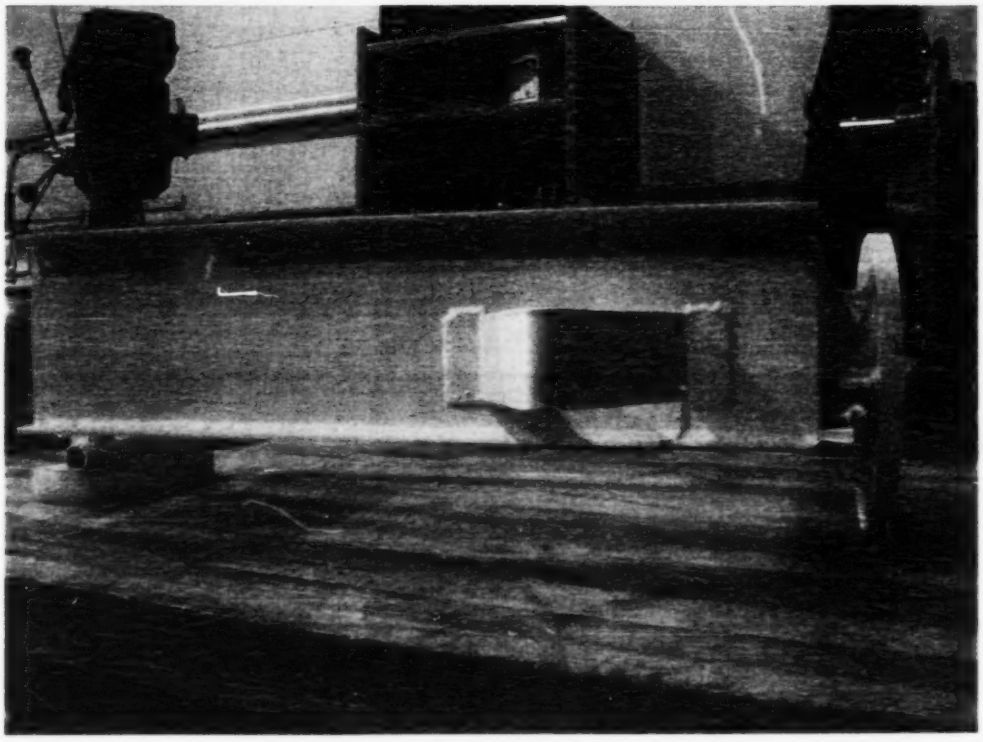


Figure 21 - Extension au boîtier

6.2 Démontage du radar

Le radar a ensuite été démonté pour accueillir le nouveau système d'entraînement. Les pièces retirées définitivement du radar sont le moteur, le réducteur et la carte de contrôle du moteur.

6.3 Remontage

L'installation du nouveau réducteur s'est déroulée comme prévu. Les figures 23 et 24 montrent l'ancien et le nouveau réducteur sur leur monture. Le nouveau réducteur entre

directement dans les trous de fixation de l'ancien réducteur. Un adaptateur a dû être fabriqué pour raccorder le réducteur à la petite roue d'entraînement.

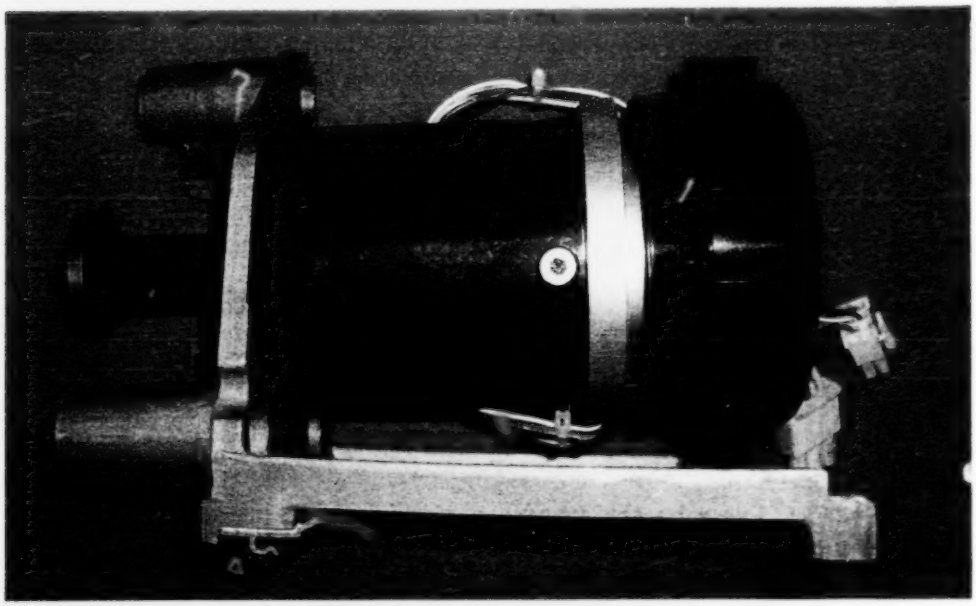


Figure 22 - Réducteur original

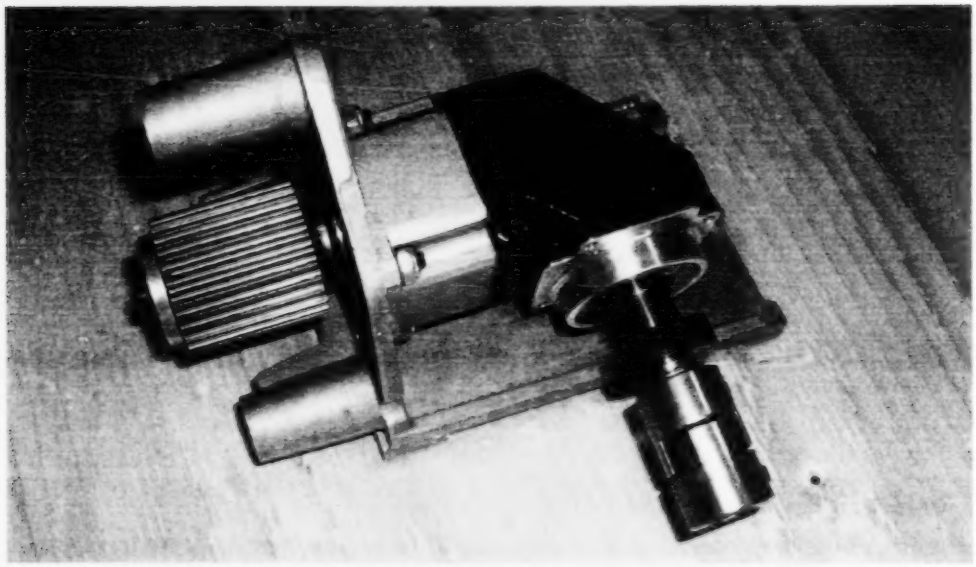


Figure 23 - Réducteur suite à la conversion

Le réducteur a ensuite été relié au moteur par un arbre de 305 mm. Afin de tolérer un léger désaxage entre le moteur et le réducteur, deux accouplements flexibles ont été utilisés, un à chaque bout. L'utilisation des accouplements flexibles a permis de réduire

considérablement les vibrations, l'échauffement du réducteur et la puissance consommée par le moteur.

La figure 20 montre la nouvelle configuration à l'intérieur du boîtier. On peut y voir le nouveau réducteur (1) et les accouplements flexibles (2 et 3).

Une difficulté s'est présentée durant l'assemblage. La plaque de protection d'un des circuits entrait en conflit interférait de quelques millimètres avec l'extension du boîtier. Elle a dû être remplacée (4). Ce problème a toutefois été pris en compte et sera réglé lors de la réalisation de la prochaine extension.

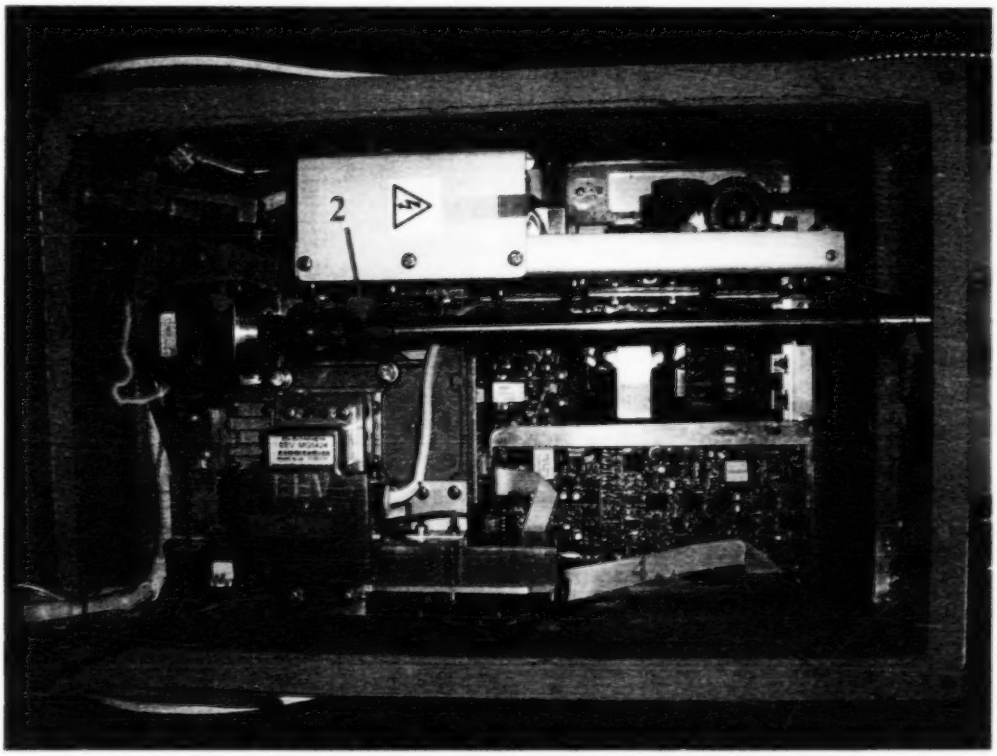


Figure 24 - Intérieur du boîtier après conversion.

Réducteur (1), accouplements flexibles (2, 3) et plaque de protection (4).

7 Caractérisation suite à la conversion

Suite à la conversion, certains essais ont été effectués sur le radar afin de confirmer la validité des modifications et de faire des comparaisons avec les résultats obtenus lors de la caractérisation initiale. La caractérisation suite à la conversion a été effectuée avec une antenne de 2540 mm (8 pieds).

7.1 Essais en température

À cause de contraintes de temps, les essais sous température ambiante contrôlée n'ont pas pu être réalisés. Les essais en température ont toutefois été réalisés. Plutôt que de fixer la température ambiante à 30 degrés Celsius, les essais ont été effectués à l'extérieur où la température a été mesurée. Le différentiel de température entre les éléments du radar et l'air ambiant a plutôt été retenu comme critère de vérification.

Les essais ont été effectués à une température ambiante de 7 degrés Celsius. L'antenne tournait à 120 tr/min. Le temps de stabilisation était de deux heures.

Comme le moteur n'est plus à l'intérieur du boîtier pour cette configuration, la mesure de température a été effectuée sur l'élément produisant le plus de chaleur à l'intérieur du boîtier, soit le réducteur. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 4 - Résultats des mesures thermiques après conversion

	Température à 120 tr/min	Différentiel
Boîtier	9 °C	2 °C
Réducteur	31 °C	24 °C

Après deux heures de fonctionnement, le réducteur s'est stabilisé à 31 °C. Le différentiel de température est donc de 24 °C par rapport à la température extérieure, ce qui est supérieur au 18 °C obtenus avec le moteur original à 45 tr/min. Toutefois, en appliquant le même différentiel de température, le réducteur atteindrait une température d'environ 54 °C avec une température ambiante de 30 °C. Le réducteur est conçu pour fonctionner jusqu'à 90 °C, la température obtenue est donc acceptable.

Pour ce qui est de la température du boîtier, son différentiel de température s'est amélioré passant de 4 à 2 °C, ce qui est probablement dû au fait que la surface de contact avec l'air ambiant est grandement accrue, ce qui facilite le refroidissement.

7.2 Validation de l'encodeur de position

La constance de la mesure de vitesse de rotation a été mesurée à 45 tr/min afin d'obtenir une comparaison avec le radar initial. Les séries d'essais avant et après conversion ont été effectués sans vent, avec une antenne de 8 pieds (244 cm), la vitesse pouvait donc être considérée comme constante. La mesure de vitesse à l'aide de la roue d'encodeur montrait toutefois des variations importantes de vitesse de rotation sur le radar avant la conversion. Des variations instantanées de 3 tr/min pouvaient être observées.

Il a été démontré que ces variations provenaient de différences dans la largeur des dents de la roue d'encodeur. Les essais avant la conversion montraient que la largeur des roues d'encodeur variait de 0,25 mm, ce qui causait une erreur de mesure angulaire de 0,187°.

Une nouvelle roue d'encodeur en aluminium anodisé a été fabriquée avec une tolérance de 0,025 mm. La figure 26 montre un gros plan de la nouvelle roue d'encodeur.

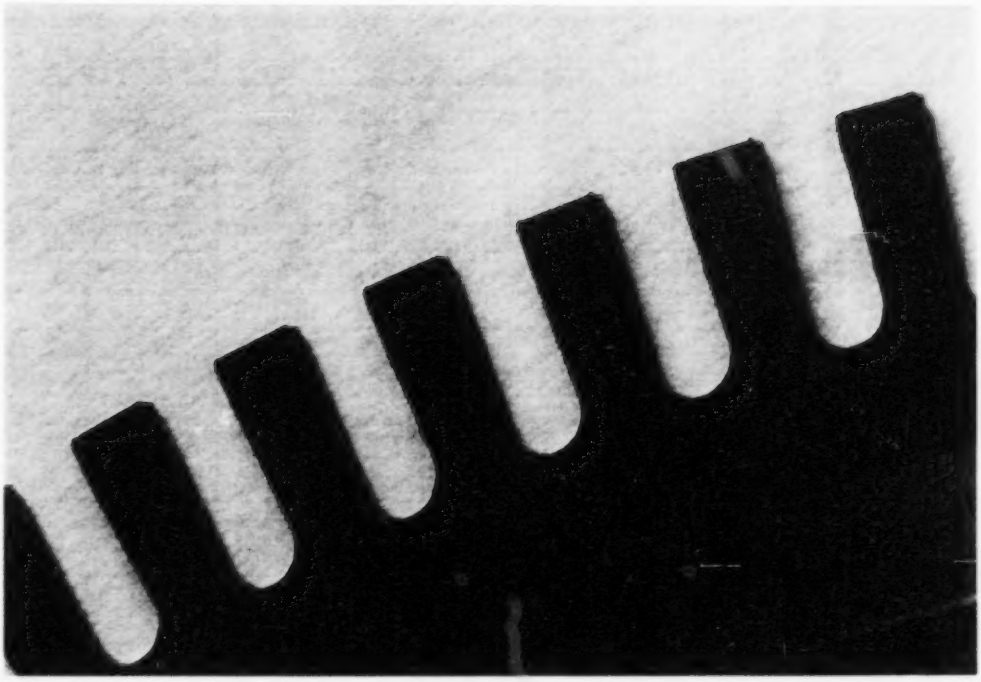


Figure 25 - Nouvelle roue dentée

La figure 27 démontre que la mesure de la vitesse de rotation est plus constante qu'avec l'ancienne roue d'encodeur. En effet, les variations brusques de vitesse passent de 3 tr/min avant la conversion à 0,4 tr/min après la conversion. En utilisant le même calcul que dans la section 2.4, on obtient :

Calcul de l'erreur de dimension des dents de l'encodeur
La distance entre deux front montants sur les dents de la roue d'encodeur est de 3,81mm.

Variation de vitesse de rotation observée : on peut observer sur la figure 27 une variation abrupte de 44,7 à 45,1 tr/min. La variation instantanée est donc de 0,4 tr/min.

L'erreur de largeur d'une dent est donc de $\frac{0{,}4\ tr/\min}{45\ tr/\min} \bullet 3{,}81\ mm = 0{,}034\ mm$

Erreur angulaire
$s = r \bullet \theta$
où r est le rayon de la roue dentée

$0{,}034\ mm = 77.788\ mm \bullet \theta$
$\theta = 0{,}0004379\ rad = 0{,}025°$

Le critère fixé par le CDT était de 0.05°. Cet objectif est donc atteint.

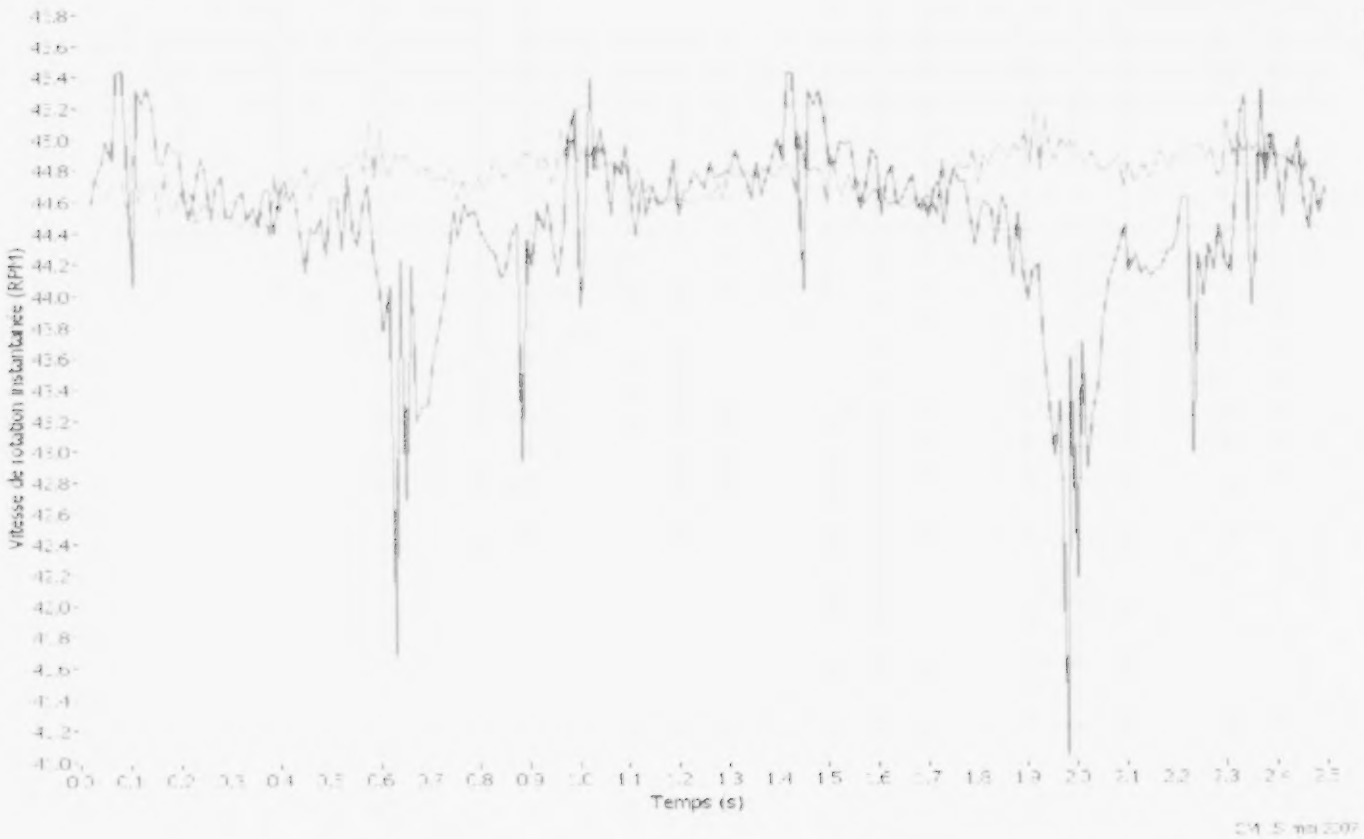


Figure 26 - Constance de la vitesse de rotation avant et après la conversion à 45 tr/min, sans vent

7.3 Essais avec vent contrôlé

Le radar a été installé sur le camion et a été soumis à des vents de 25, 50, 70 et 100 km/h. Cette série de mesures a permis, à partir des puissances électriques mesurées, de confirmer le couple subi et de préciser les spécifications du moteur. De plus, il a été convenu que les variations de vitesse de rotation de l'antenne ne devront pas dépasser 10 % à 120 tr/min, 100 km/h.

Le tableau 5 montre les variations de puissance en fonction de la vitesse du vent lorsque l'antenne tourne à 120 tr/min. Les puissances indiquées sont la valeur maximale enregistrée sur 20 secondes. On peut y voir que la puissance instantanée atteint 880 W à 120 tr/min, 100 km/h. Les puissances consommées pour des rotation de 28 et 45 tr/min ont aussi été ajoutées à titre indicatif.

Tableau 5 - Puissance mesurée suite à la conversion

Vitesse (km/h)	Puissance à 25 tr/min	Puissance à 45 tr/min	Puissance à 120 tr/min
0	x	x	396 W
25	x	x	460 W
50	x	x	570 W
70	x	x	724 W
100	95 W	205 W	880 W

x : non mesuré

Ces données sont également représentées dans la figure 28.

À partir de la vitesse de rotation et de la puissance fournie au moteur, on peut déduire que le couple instantané maximal atteint 5.8 N.m, soit 72 % du couple nominal du moteur.

En supposant l'accroissement de puissance comme étant linéaire et en extrapolant pour un vent de 180 km/h, la puissance crête est estimée à 1250 W, ce qui correspond aux estimations faites précédemment.

La figure 29 montre les variations de vitesse de rotation. On peut y voir que la vitesse se maintient entre 116 et 123 tr/min, ce qui correspond à des variations de plus ou moins 3 %, l'objectif de constance de vitesse à 120 tr/min, 120 km/h est donc atteint.

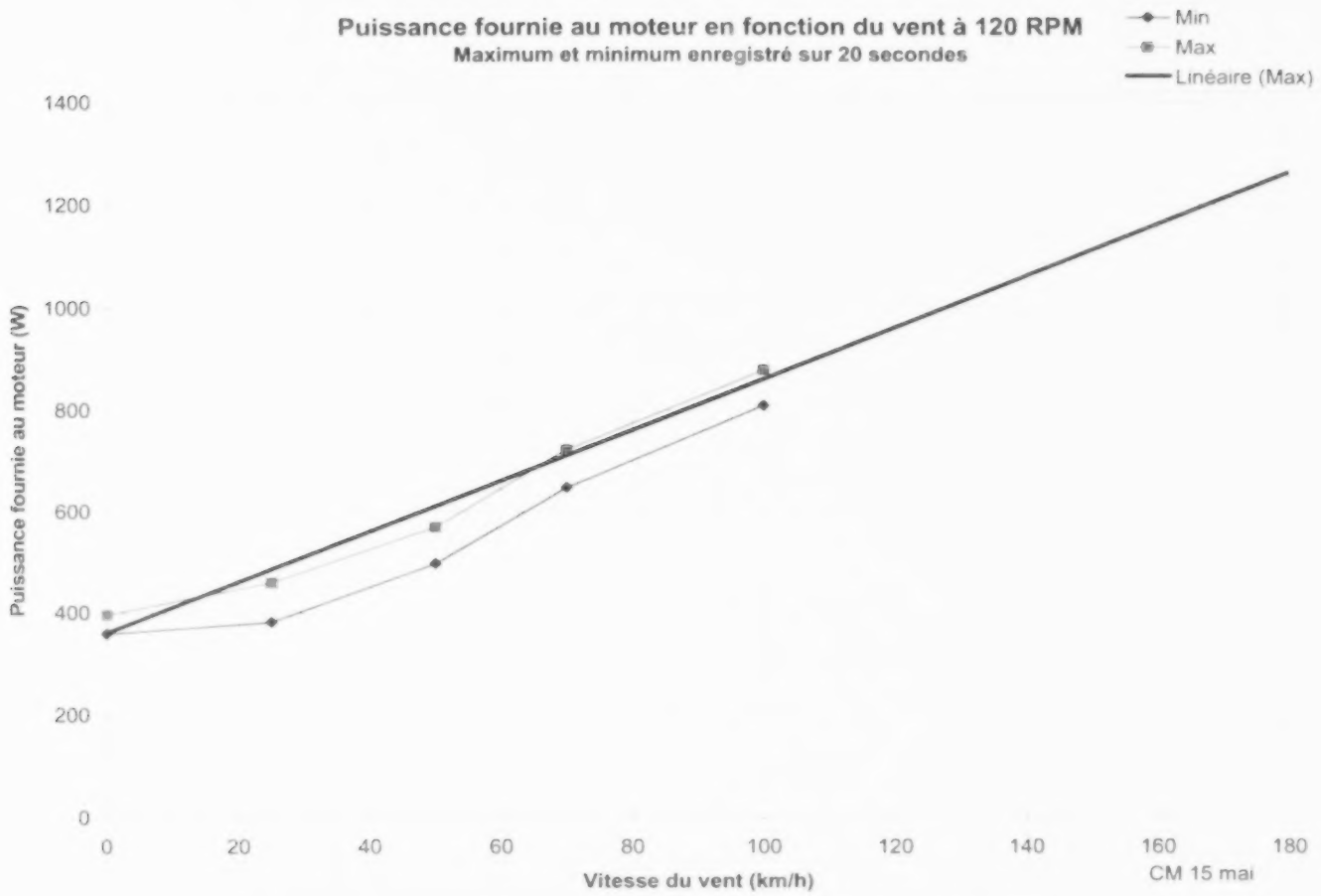


Figure 27 - Puissance fournie au moteur en fonction du vent à 120 tr/min

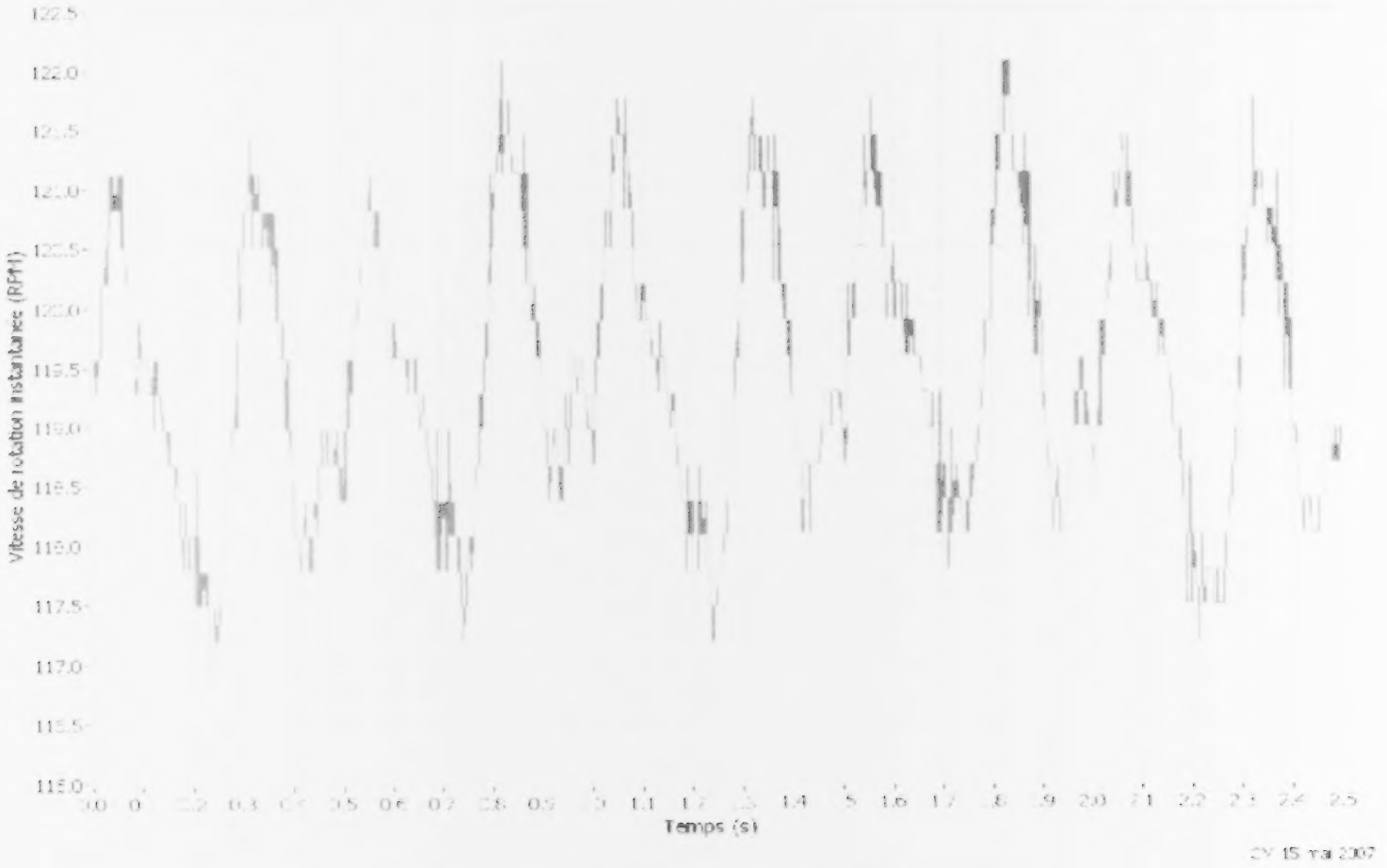


Figure 28 - Constance de la vitesse de rotation à 120 tr/min, sans vent

7.4 Essais en fonctionnement continu

Jusqu'à maintenant le radar a été mis en fonction pour une période de plus d'une semaine, dont six jours en continu sur le montage de la figure 31. Le radar a notamment fonctionné pendant environ deux heures sur le camion (figure 30) en mouvement à des vitesses atteignant 100 km/h. Cet essai a permis de confirmer le bon fonctionnement de l'ensemble des composantes ajoutées. Aucun problème n'a été constaté quant au fonctionnement du moteur et de son contrôleur. De plus, la courroie ne s'est pas dégradée anormalement durant cette période. Les températures du réducteur, du boîtier et du moteur ont également été observées et rien d'anormal n'a été observé.

Figure 29 - Montage d'essai sur camion

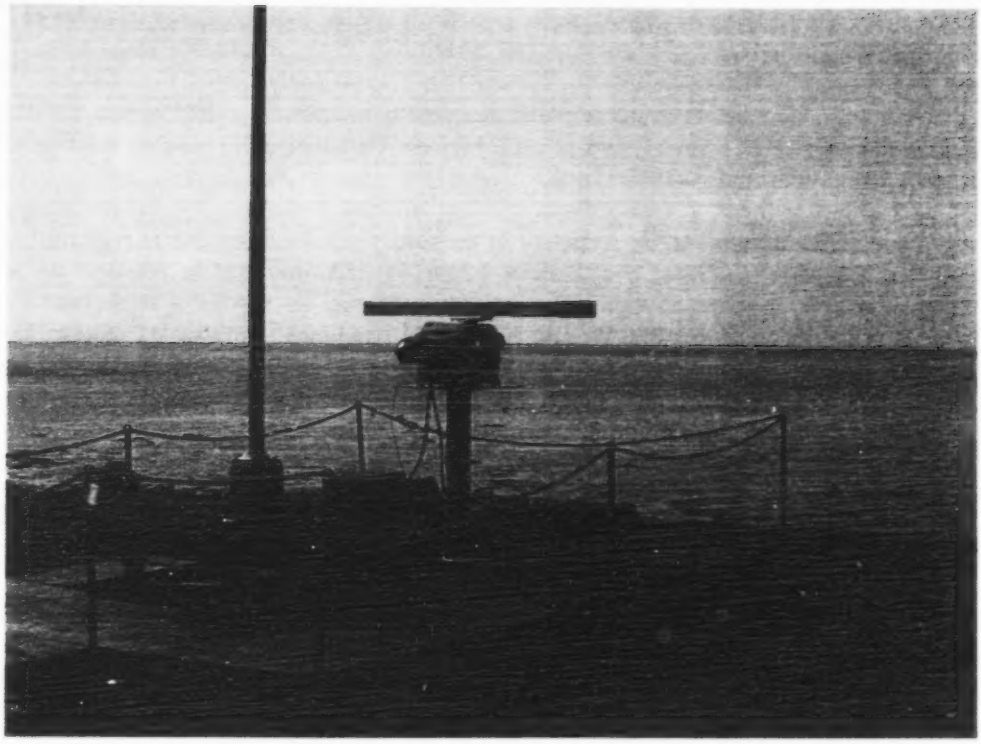


Figure 30 - Montage d'essai sur plateforme fixe

8 Conclusion et recommandations

8.1 Conclusion

Les activités de caractérisation ont permis d'identifier la configuration originale du système d'entraînement du radar BridgeMaster E et déterminer les spécifications des pièces requises pour sa conversion pour la rotation à 120 tr/min.

Un concept de conversion du système d'entraînement a ensuite été développé. L'échéancier étant très serré, la configuration de type moteur externe, très robuste, a été retenue. La configuration externe au boîtier du moteur et son contrôleur réduit les élévations de température et l'interférence électromagnétique entre le contrôleur de moteur et l'électronique du radar. En plus d'être robuste, ce type de conversion a l'avantage d'être entièrement réversible car aucune pièce du radar n'est modifiée. L'ensemble de conversion, incluant les pièces et les instructions, pourra être vendu en prêt-à-monter. La conversion pourra être effectuée rapidement sur place, sans nécessiter d'équipements spécialisés.

La conversion conçue a ensuite été mise en œuvre. Étant donné la qualité du modèle tridimensionnel utilisé pour la conception, la conversion a été réalisée avec relativement peu d'imprévus et aucune modification notable n'a été apportée au plan prévu. La

conversion a été réalisée en grande partie à partir de pieces industrielles, éprouvées et à coût relativement faible.

Le bon fonctionnement du système d'entraînement a ensuite été validé pendant d'une période d'essais de 24 heures. Pendant cette période, l'antenne a été mise en rotation et exposée à des vents atteignant 100 km/h.

Les températures du moteur, du réducteur et du boîtier ont été observées et sont restées normales. La période d'essai a également permis de s'assurer que la courroie ne se dégradait pas de manière anormale. La puissance fournie au moteur a également été mesurée et ne dépassait pas 880 W, soit 56 % de la puissance nominale du moteur. De plus, les variations de vitesse ne dépassaient pas 3 % à 120 tr/min, 100 km/h. Le problème de mesures d'azimut a également été réglé avec le remplacement de la roue d'encodeur. Aussi, le nouveau circuit de multiplication de la fréquence peut fonctionner sur toute la plage d'opération du radar sans nécessiter d'ajustements sur la carte.

Les objectifs visés dans ce projet ont donc tous été atteints, le radar a été converti avec succès et la méthode de conversion a été développée et documentée.

8.2 Recommandations

Bien que tous les objectifs aient été atteints, certains aspects de la conversion peuvent être améliorés.

D'abord, la constance de la vitesse de rotation respecte les spécifications mais elle pourrait être améliorée en optimisant l'utilisation du contrôleur de moteur. Celui-ci comporte un régulateur PID qui utilise actuellement le courant fourni au moteur comme rétroaction. L'utilisation de la vitesse de sortie par l'intermédiaire du signal d'azimut contribuerait à une meilleure régulation de la vitesse. Une autre approche, soit l'utilisation d'un moteur synchrone, pourrait également être évaluée.

Atténuation des difficultés de maintenance

Des difficultés de maintenance pourraient être constatées sur la nouvelle configuration. L'extension au boîtier rend plus difficile l'accès à certaines cartes et le poids des pièces ajoutées rend l'ouverture du boîtier plus difficile.

Ces difficultés pourraient toutefois être amoindries. D'abord, l'utilisation d'un moteur plus léger pourrait être considérée. Toutefois, le moteur de remplacement devrait rencontrer les mêmes spécifications de couple et de puissance que le moteur actuel. Le placement du moteur du côté du pivot d'ouverture pourrait être considéré. Cette position du moteur réduirait le poids à soulever lors de l'ouverture et aussi la longueur du couvercle en position ouverte.

L'extension au boîtier pourrait être réalisée en aluminium, ce qui réduirait considérablement son poids. Aussi, l'ouverture du boîtier par le côté plutôt que par le bout faciliterait la maintenance. Il serait ainsi plus facile à ouvrir puisque le poids serait moins éloigné du pivot.

Électronique
Actuellement, le signal d'encodeur est obtenu en soudant un fil sur la carte sur laquelle les détecteurs optiques sont situés. Après la conversion, cette carte est seulement utilisée pour détecter le passage des dents de la roue d'encodeur. Son circuit de multiplication de fréquence n'est plus en fonction.

De plus, il a été mentionné par Rutter Technologies qu'il serait préférable que l'azimut soit transmis au module d'affichage par le protocole RS-422.

Une nouvelle carte combinant la détection des dents, la multiplication de fréquence et la transmission par RS-422 pourrait être développée. Cette nouvelle carte faciliterait la conversion en réduisant le nombre de manipulations et faciliterait la communication avec le module d'affichage.

Réduction des coûts
Un autre aspect qui pourrait être amélioré serait l'optimisation du coût de conversion.
Le tableau de l'annexe D ventile les coûts de conversion estimés.

Dû à sa fabrication à la main, l'extension au boîtier est la pièce la plus coûteuse de la conversion à 2500 $, dont plus de 80 % en temps de main d'œuvre. Un procédé de fabrication mieux adapté à la fabrication en série pourrait être développé et permettrait de réduire considérablement le temps et le coût de fabrication, tout en améliorant la qualité et la reproductibilité de cette pièce.

De plus, la validation d'une roue d'encodeur fabriquée selon un procédé moins coûteux permettrait également de réduire les coûts de conversion.

Certification
Les radars marins doivent être conformes à la norme IEC 60945. La conversion du radar annule sa conformité à cette norme. Sans refaire une certification complète, il serait pertinent de soumettre un radar converti aux essais requis par cette norme. En plus de permettre de déceler certains vices de conception, cela donnerait une valeur ajoutée à la propriété intellectuelle de la conversion. Le procédé de fabrication devrait toutefois être normalisé.

Bibliographie

Northrop Grumman, Manuel technique de l'unité radar BridgeMaster E

EBM Papst Fiche de spécification du moteur ECA 70.10, www.ebmpapst.de

GYSIN, Fiche de spécification de la boîte de vitesse GPL-080, www.gysin.com

Marathon Electric, fiche de spécification du moteur Y551, http://www.marathonelectric.com/

ABB, Fiche de spécification du contrôleur de moteur ACS350, http://www.abb.com

NYE, Fiche de spécification du lubrifiant Nyogel 792D, www.nyelubricants.com

SKF, Fiche de spécification du roulement 3209 A-2RS1TN9/MT33, www.skf.com

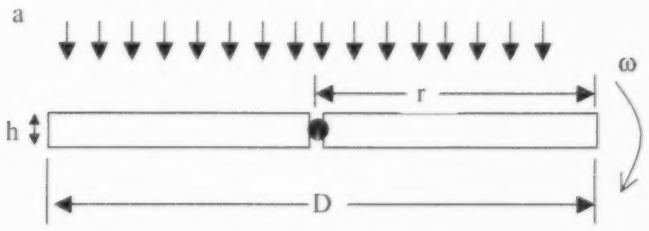
Apex Dynamics, Fiche de spécification du réducteur de la série AB060, www.apexdynamicsusa.com

Annexes

Annexe A - Modèle du couple causé par le vent sur une antenne radar

Modèle fourni par Charles Gautier, CDT

Couple de l'antenne sans vent:



a:	vitesse du vent, (m/s)
D:	diamètre de l'antenne, (m)
h:	hauteur de la face de l'antenne, (m)
r:	variable de rayon à partir du centre de rotation, (m)
ω:	vitesse de rotation de l'antenne, (rad/sec)
R = D/2:	rayon extrême de l'antenne, (m)

$$P = Cd\frac{1}{2}\rho(r\omega)^2$$

P =	pression sur la surface exposée au vent
Cd =	coefficient de traînée
ρ =	densité de l'air

$$T = \frac{Cd_i \rho \omega^2 h R^4}{8}$$ Couple

T =	Couple généré par un côté de l'antenne
Cd_i =	Coefficient de traînée pour la surface i

Le couple de rotation dépend du coefficient de traînée. Sur la face de l'antenne, il peut être entre 1.2 et 2.0, sur la face arrière de l'antenne (plus profilée), il peut être entre 0.1 et 0.5.

Cd_1 = coefficient de face = 1.5
Cd_2 = coefficient arrière = 0.5

Le couple de l'antenne est généré par 4 faces de l'antenne, deux faces frontales et deux faces arrière. En l'absence de vent, une des faces frontales et une des faces arrière ne sont pas exposées au vent. Les deux autres faces sont exposées exclusivement au vent généré par la rotation de l'antenne. Les faces non exposées au vent sont en fait exposées à un vacuum partiel mais tellement faible qu'il est négligeable.

Le couple final est donc:

$T = T_1 + T_2$

Couple de l'antenne avec vent:

En présence du vent, les conditions changent dramatiquement.

Face 1 : la première face frontale est exposée au vent de rotation ajouté au vent frontal.
Face 2 : la deuxième face frontale est exposée au vent frontal moins la vitesse de rotation
Face 3 : la première face arrière est exposée uniquement au vent de rotation d'antenne
Face 4 : la dernière face arrière n'a aucun effet.

P_1 = pression face 1
P_2 = pression face 2
P_3 = pression face 3
P_4 = pression face 4 = 0

$$P_1 = Cd_1 \frac{1}{2} \rho (r\omega + a)^2$$

$$P_2 = Cd_1 \frac{1}{2} \rho (a - r\omega)^2$$

$$P_3 = Cd_2 \frac{1}{2} \rho (r\omega)^2$$

Par conséquent, après calcul du couple sur la longueur de l'antenne :

$$T_1 = Cd_1 \rho hR^2 \left[\frac{3R^2\omega^2 + 8R\omega a + 6a^2}{24} \right]$$

$$T_2 = -Cd_1 \rho hR^2 \left[\frac{3R^2\omega^2 - 8R\omega a + 6a^2}{24} \right]$$, puisque le couple sur cette face combat T_1 et T_3

$$T_3 = \frac{Cd_2 \rho \omega^2 hR^4}{8}$$

Le couple final est donc :

$T = T_1 + T_2 + T_3$

En examinant de plus près, on remarque que T1 + T2 fait tomber plusieurs termes qui s'annulent, de sorte que le couple frontal final est:

$$T_F = \frac{2}{3} C d_1 \rho h \omega a R^3$$

et par conséquent le couple final:

$$T = T_F + T_3$$

On remarque immédiatement que le couple varie proportionnellement à la vitesse du vent, ce qui est fort surprenant mais en accord avec la théorie. En pratique, l'effet de vacuum sur la face arrière de l'antenne, ainsi que d'autres effets secondaires, feront probablement dévier de la courbe linéaire.

Annexe B - Évaluation de puissance de moteur

Modèle fourni par Charles Gautier, CDT.
Modèle effectué à partir des mesures prises par Innovation maritime sur l'antenne du radar Raytheon le 31 mai 2006.

Puissance de moteur pour une antenne Raytheon:

V(km/h)	25 rpm	120 rpm
0	126 W	386 W
70	184 W	454 W
100	328 W	638 W

En se référant au document « Calculs du couple », daté du 2007-02-26 (annexe A), on relève les équations suivantes :

$T = T_f + T_3$

$$T_f = \frac{2}{3} C_{d1} \rho h \omega v R^3$$

d'où

$$P_f = a \omega v$$

Où ***a*** est une constante de proportionnalité remplaçant les autres paramètres,

$$T3 = \frac{C_{d2} \rho \omega^2 h R^4}{8}$$

$$P_3 = b \omega^2$$

Où ***b*** est une constante de proportionnalité remplaçant les autres paramètres.

Finalement, on remarque qu'en l'absence du vent ou de rotation, il y a une puissance P_0 minimum du système.

On peut donc établir une équation finale pour l'expression de la puissance :

$$P = P_0 + P_3 + P_f = P_0 + b\omega^2 + a\omega v$$

Sous forme matricielle :

$$P = \begin{bmatrix} 1 & \omega^2 & \omega v \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_0 \\ b \\ a \end{bmatrix}$$

On peut alors construire une matrice contenant toutes les combinaisons de vents et rotations :

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \omega_1^2 & \omega_1 v_1 \\ 1 & \omega_2^2 & \omega_2 v_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \omega_i^2 & \omega_i v_i \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_0 \\ b \\ a \end{bmatrix}$$

Symboliquement :

Y = X*B

En isolant B :

$B = (X'X)^{-1}X'Y$

À l'aide des mesures du tableau ci-haut, on trouve :
P0 = 200
b = 0.012142
a = 0.020944

Ces valeurs sont pour une antenne de 88", pour une antenne de 100", on peut faire l'extrapolation suivante :

Nous savons que ***b*** est proportionnel à R^4, et que ***a*** est proportionnel à R^3.
Donc,

$$b_2 = b_1\left(\frac{50}{44}\right)^4 = 0.02024695$$

$$a_2 = a_1\left(\frac{50}{44}\right)^3 = 0.03073347$$

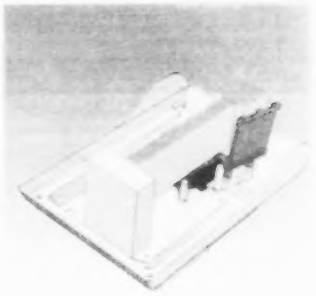
Donc, pour une antenne de 100 pouces :

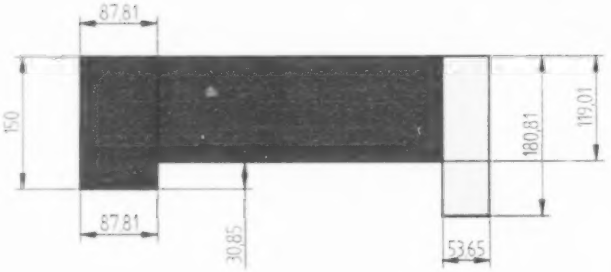
$$P = P_0 + b_2\omega^2 + a_2\omega v$$

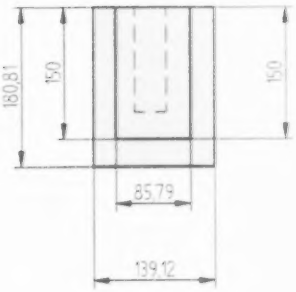
et à 120 rpm, P = 1155 W

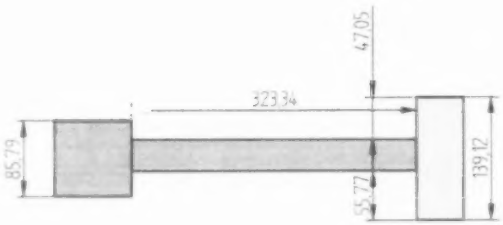
Annexe C - Espace disponible à l'intérieur du boîtier

Dimensions en millimètres de la pièce virtuelle









Annexe D - Estimation du coût de conversion

Moteur			650,00 $
Contrôleur			520,00 $
Couplage moteur-réducteur			150,00 $
Réducteur			1 178,00 $
Matériaux pour extension			200,00 $
Boîte électrique extérieure			250,00 $
Circuit azimut			200,00 $
Roue encodeur (aluminium anodisé)			245,00 $
Câblage			200,00 $
Quincaillerie			200,00 $
Administration			360,00 $
Temps			4 880,00 $
Démontage/remontage pour roue d'encodeur	5	h	
Fabrication de l'extension			
- Couper les 18 pièces			
- Soudage			
- Sandblast et peinture			
- Modification aux systèmes de fermeture	30	h	
Assemblage carte azimut	5	h	
Assemblage radar	7	h	
Contrôle qualité	14	h	
Total			**9 033,00 $**